

博 士 論 文

真空中における固体絶縁体の帯電計測

Measurement of Surface Charging on Solid Insulation
Materials in Vacuum

金沢大学大学院自然科学研究科
数物科学専攻

学籍番号	1223102013
氏名	森田 裕
主任指導教員名	鎌田 啓一 教授
提出年月	2016 年 1 月

目 次

1. 序論	1
1.1 背景	1
1.2 真空絶縁の特性と課題	4
1.2.1 気体圧力と放電電圧	4
1.2.2 真空ギャップ放電	5
1.2.3 コンディショニング効果	7
1.2.4 沿面放電	7
1.2.5 真空中の沿面放電	9
1.2.6 課題	12
1.3 研究経過	13
1.4 本研究の目的	13
2. 真空中表面電位計測装置の開発	15
2.1 装置の概要	15
2.2 表面電位計	16
2.3 プローブ移動機構	18
2.4 真空容器	19
2.5 高電圧電源	20
2.6 計測システム	21
2.7 計測精度	22
3. 電圧印加中における電位分布測定	26
3.1 目的	26
3.2 測定方法	26
3.3 測定結果	29
3.3.1 試料 A の電位分布測定結果	29
3.3.2 試料 B の電位分布測定結果	30
3.3.3 試料 C の電位分布測定結果	30
3.4 まとめ	34
4. 電圧 OFF による帯電電位分布測定	35
4.1 目的	35
4.2 測定方法	35
4.2.1 測定試料の粗面化	35
4.2.2 測定試料	38
4.2.3 測定方法	39
4.3 測定結果	40
4.4 まとめ	45
5. 放電による帯電の電位分布測定	46
5.1 目的	46

5.2 測定方法	47
5.2.1 測定試料	47
5.2.2 測定方法	49
5.3 測定結果	50
5.3.1 放電回数と放電電圧	50
5.3.2 放電後の表面電位測定結果	54
5.4 まとめ	62
6. 考 察	63
6.1 表面凹凸による帯電抑制の効果に関する考察	63
6.2 抵抗率に関する考察	64
6.3 帯電メカニズムに関する考察	66
6.3.1 微小放電による帯電メカニズム	66
6.3.1 大きな放電による帯電メカニズム	67
6.4 帯電と放電電圧の関係に関する考察	69
7. 結 言	70
7.1 結論	70
7.2 今後の展望	70
8. 参考文献	73

1. 序論

真空中での放電は古くから研究されているが、そのメカニズムが未解明であることも多い。特に固体絶縁物の帯電や沿面放電現象については現象そのものを観測することが難しい。電子・荷電粒子ビーム装置ではその構造上、真空中でのビームの生成、加速、収束等を目的とした高電圧電極が真空中に置かれるため、真空を介した電気絶縁が必須となる。また、宇宙機に関しては、運用される環境が大気圏外であるため、真空中での絶縁が必要となる場合が多い。

本研究では真空中での放電現象の解明や真空絶縁機器の性能向上を目指し、真空中の固体絶縁物の電位を計測する装置を開発すること、さらに、その応用として、X線管の絶縁体を想定したガラス表面に微小な凹凸を付けて粗面化した場合の表面電位分布を測定し、絶縁体の沿面放電と帯電の関係を明らかにすることを目的とする。背景と目的の詳細を下記に述べる。

1.1 背景

電気絶縁媒体としては、固体・液体・気体がある。

固体絶縁体は樹脂やゴムをはじめとする有機物、アルミナセラミック等の無機物に分けられ、前者は加工により様々な形状に適用可能であること、後者は耐熱温度や強度が高いことが特徴である。固体絶縁体は非常に多くの種類が実用化されており、それぞれの特徴に応じてほぼ全ての電気機器に適用されている。

液体絶縁体には石油から精製される鉱油、人工的に合成されるシリコーン油、パーフルオロカーボン等の電気絶縁用液体がある。液体絶縁体は固体絶縁体に近い耐電圧性能を有することとともに、絶縁する対象物の形状を問わないこと、対流による熱輸送が期待できること等から、例えば変圧器における複雑な形状のコイルの絶縁、スーパーコンピュータのCPUの絶縁および冷却等に用いられる。

気体では高電圧機器用絶縁気体のひとつとして六フッ化硫黄ガス(以後、SF6)が知られている。SF6は電子親和力が大きく絶縁耐力が高いため[1]、遮断器、変圧器等の電力機器をはじめ、電子顕微鏡等の高電圧機器にも用いられている[2]。SF6は人体には無害であるものの、地球温暖化係数が23900であり、京都議定書の削減対象ガスの一つとされている。なお、空気も良好な絶縁体である。

明確には媒体とは言えないが、真空も絶縁に利用される。真空による絶縁は電圧部を支持する少量の固体絶縁と真空空間の組み合わせで構成されることから、環境負荷が小さく、環境対応技術として注目されている[3]。例えば、従来はSF6ガス絶縁方式が主流であった遮断器の分野では、さらに高い電圧においても真空遮断器に代替されるようになりつつある[4]。

X線管、電子顕微鏡、イオンビーム装置、電子線描画装置、加速器、ブラウン管、真空管等の電子・荷電粒子ビーム応用機器については、真空中でのビームの生成、加速、収束等を目的とした高電圧電極が真空中に置かれるため、真空を介した電気絶縁が必須となる。宇宙機に関しては、運用される環境が大気圏外であるため、真空中での絶縁が必要となる場合が多い。例えば、人工衛星に搭載される太陽電池パネルでは、太陽風による荷電粒子を原因とした帯電や、過酷な温度環境による絶縁劣化等が課題である[5][6]。

真空絶縁機器の例として図1にX線管の構造を示す。真空中に設置された陰極と

陽極の間に高電圧電源を用いて数十 kV 以上の電圧を印加し、陰極のフィラメントを陰極加熱用変圧器からの電力により抵抗加熱すると、陰極から放出された熱電子が陰極と陽極間の電界により加速され、陽極に衝突する。この衝突時の制動放射により特性 X 線と連続 X 線が発生する。大出力の X 線管では熱電子の衝突により陽極の過熱と融解を防止するため、ロータとステータから構成されるモータにより陽極を回転させ、局所的な過熱を防ぐ構造を採用することが多い。これを回転陽極型 X 線管と呼ぶ。X 線管では真空容器としてガラスを用いることが多い。ガラスは複雑な形状に加工でき、ガス透過係数が非常に低く、真空容器として優れた材料である。特にホウ珪酸ガラス(パイレックス®)では一般的には $10^{-15} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であるため、絶縁材としても優れた特性を示す。

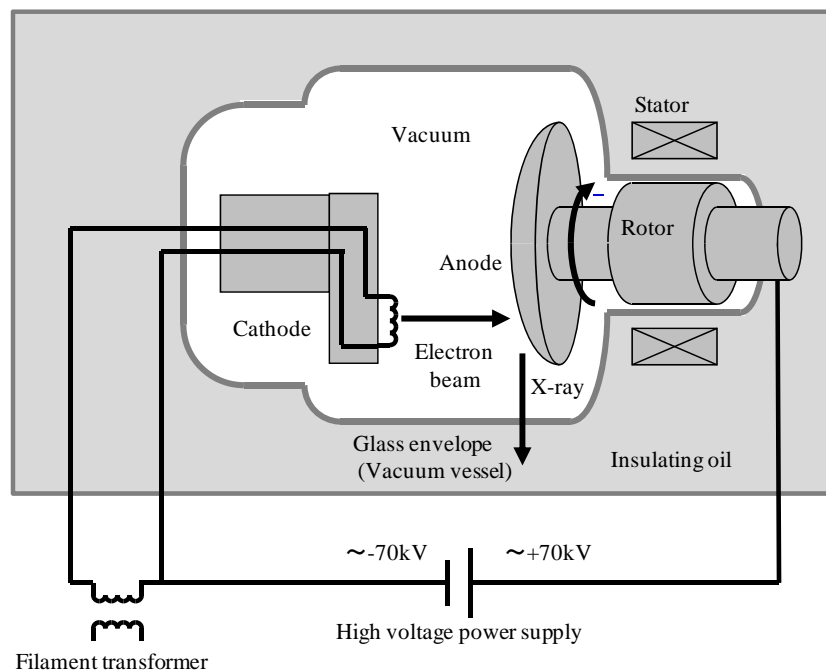


図 1 X 線管 (回転陽極型) の構造例

陰極(Cathode)と陽極(Anode)間に高電圧を印加し、フィラメント変圧器(Filament transformer)から供給される電流によって陰極フィラメントを抵抗加熱すると、陰極から熱電子が放出される。この電子ビーム(Electron beam)が電界によって加速され、陽極に衝突することによる制動放射により、X線が発生する。

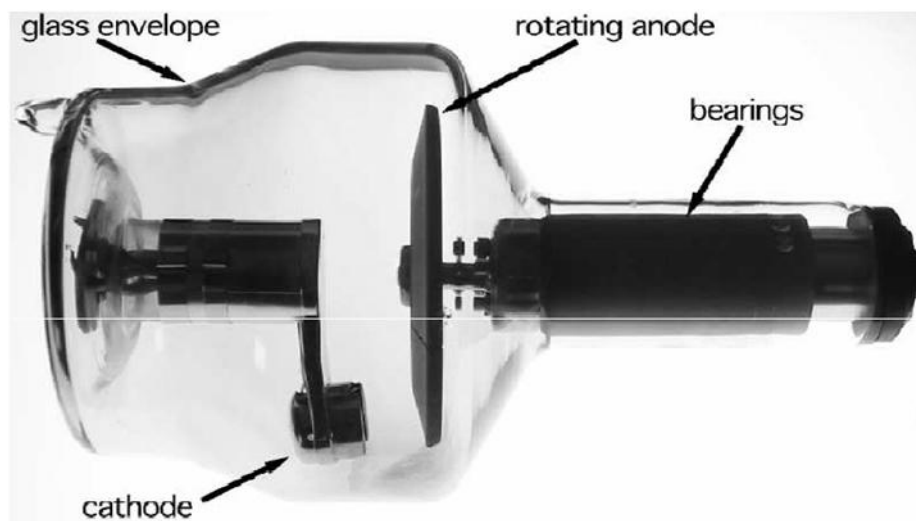


図2 X線管 (回転陽極型) の例

X線管のガラス容器(Glass vessel)内部の実体写真を示す。

もうひとつの例として、図3に走査型電子顕微鏡(Scanning electron micrometer, SEM)のと電子銃の構成例を示す。電子ビームを生成する電子銃が最上段に設置される。生成された電子ビームは複数の集束レンズを通して収束され、偏向レンズで走査され、試料の任意の位置に照射される。その際に発生した二次電子の強度を二次電子検出器にて電気信号に変換することにより、試料の微細構造を観察することができる。電子銃は熱電子銃、ショットキー電子銃および電界放出電子銃が用いられる。

熱電子銃はフィラメントと陽極との間に高電界を発生し、フィラメントの加熱により発生した熱電子を加速し電子ビームを発生するものである。図中のウェーネルト電極は電子ビームの電流を制御に用いられる。

一般的に走査型電子顕微鏡における電子銃の電圧は最大で数十kV程度である。電子銃を構成する絶縁体にはセラミックス、ガラス等の無機物の固体絶縁体等が採用される。透過型電子顕微鏡では試料を電子を試料に透過させるために高エネルギーの電子ビームが必要であり、電子銃後段に電界を発生する加速管を組み込んだ構成が一般的である。世界最高分解能の透過型電子顕微鏡の電子ビームの最大エネルギーは1.2MeVに達する[2]。

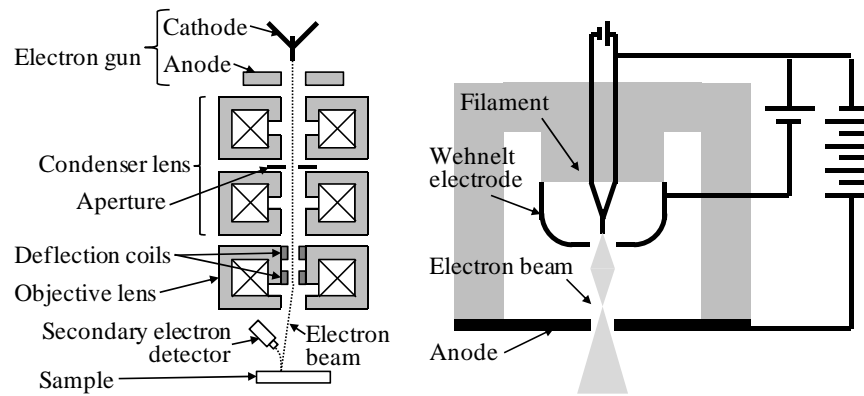


図3 走査型電子顕微鏡(左)と熱電子銃の構成例(右)

電子銃(Electron gun)で熱電子放出された電子ビームは複数の収束レンズ(Condenser lens), 絞り(Aperture), 偏向レンズ(Deflection lens)を通過し試料(Sample)に衝突する。衝突による二次電子の個数を二次電子検出器(Secondary electron detector)で検出することにより, 試料の表面状態を観察できる。熱電子銃はフィラメント(Filament)で発生した熱電子がフィラメントと陽極(Anode)の間の電界により加速され電子ビーム(Electron beam)を発生する。

1.2 真空絶縁の特性と課題

真空中での放電現象と絶縁特性については古くから研究されており[7], データの蓄積もある。それらの中から, 真空中の高電圧絶縁に関する特性とその課題を下記に示す。

1.2.1 気体圧力と放電電圧

気体圧力と電極間距離の積(pd 積)と火花放電電圧の関係はパッシェンの法則によく従うことが知られている。横軸を圧力と平行平板電極間の距離の積(pd 積), 縦軸を火花放電による破壊電圧とすると, 気体の種類により一定の曲線が得られる。この実験則は発見者の名前に因んでパッシェン曲線あるいはパッシェンの法則と呼ばれる。

例として, 図4に空気のパッシェン曲線を示す。パッシェン曲線によると, pd 積が小さくなると火花放電電圧が低くなり, 空気では概ね $10^{-3}\text{MPa}\cdot\text{mm}$ で火花放電電圧は最低値(パッシェンミニマム)となる。さらに気圧が低くなると放電電圧は増加する傾向がある。

この現象は, パッシェンミニマムの右側では圧力が高く電子の平均自由行程が短く, 電子が十分に加速されないこと, あるいは電極間距離が長く電子の加速には高電界が必要となることによると解釈できる。逆に, パッシェンミニマムの左側では, 圧力が低く電子の平均自由行程が長く電子が十分に加速しにくいこと, あるいは電極間距離が短く電子が加速される前に電極に到達してしまうことによると解釈できる[7][8]。

一般的に, 大気中の耐電圧は1mmで3kVであると言われる。参考のため, 電界一定である 3kV/mm の直線を図4に追記した。パッシェン曲線と電界一定の 3kV/mm の直線を比較すると, 大気圧である 0.1MPa において電極間距離が1mmであれば耐電圧

は 3kV であり，双方がよく一致している。しかし，横軸の pd 積が $0.1\text{MPa}\cdot\text{mm}$ からずれると耐電圧に違いが現れる。

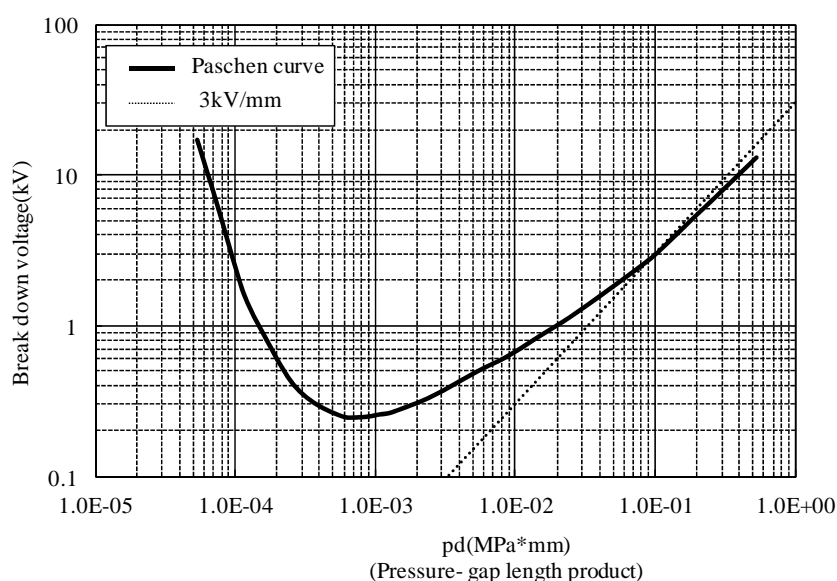


図 4 乾燥空気のパッシェン曲線[7]

横軸を圧力と平行平板電極間の距離の積(pd 積, Pressure-gap length product), 縦軸を火花放電による破壊電圧(Breakdown voltage)とすると, 気体の種類により一定の曲線が得られる。この実験則は発見者の名前に因んでパッシェン曲線(Paschen curve)あるいはパッシェンの法則と呼ばれる。

1.2.2 真空ギャップ放電

さらに圧力の低い領域における平行平板電極において直流を印加した場合の放電電圧の圧力依存性を図 5 に示す。これらはパッシェン曲線の左側に相当する。圧力が低い領域である 10^{-3}Pa 以下の高真空では, 火花放電電圧の圧力依存性がほぼなくなり, 放電電圧は一定となることが知られている。ただし, 放電電圧が一定となる領域ではギャップ長が大きくなると放電電圧は低下する傾向がある。言い換えれば, ギャップ長が大きくなると, ギャップ間で許容できる電界は小さくなる。

真空内での電極間ギャップ放電のメカニズムは完全には解明されておらず, 複数の説が提唱されている。以下にそのいくつかを述べる。

陰極から放出された電子が気体分子との衝突電離を発生せず, 直接陽極に達し, その衝突で発生した正イオンや X 線が陰極にも到達し, 電子の放出を増大させ, 放電に至るという説がある。これを陽極加熱説と呼ぶ[8][9]。したがって, 陽極は融点が高く, 熱容量が大きければ放電に至りにくいと説明できる。図 6 に陽極材料と破壊電圧の関係を示す。融点 T_m , 比熱 C_p , 比重 D_m に対して, 絶縁破壊電圧 $V_b = A \cdot T_m^a \cdot C_p^b \cdot D_m^c$ が成立する[7]。ここで $A=1.56$, $a=0.77$, $b=0.53$, $C=0.29$ である。例えば, 高融点であるモリブデン製陽極(融点 2622°C , 比熱 $275\text{J/kg}\cdot\text{K}$, 比重 10.22)は銅(融点 1083°C , 比熱 $414\text{J/kg}\cdot\text{K}$, 比重 8.93)の約 1.5 倍の耐電圧性能を期待できる。

また, 電極表面に付着したクランプ(研磨材料の残渣や不純物粒子)が帯電し, それが印加電圧による静電気力により加速され, 反対側の電極に衝突し, クランプある

いは電極材料である金属が蒸発し、この蒸発成分により電極間が短絡するという説もある[8][9]。

その他の説もあるものの、放電現象全体としての理論的説明は十分ではない。一方、実験的アプローチでは、非常に速い現象である放電において、電子の電荷から kA オーダに至る放電までを一貫して測定することは困難である。理論的にも実験的にも真空中の放電現象の理論的説明は道半ばであると考えられる。

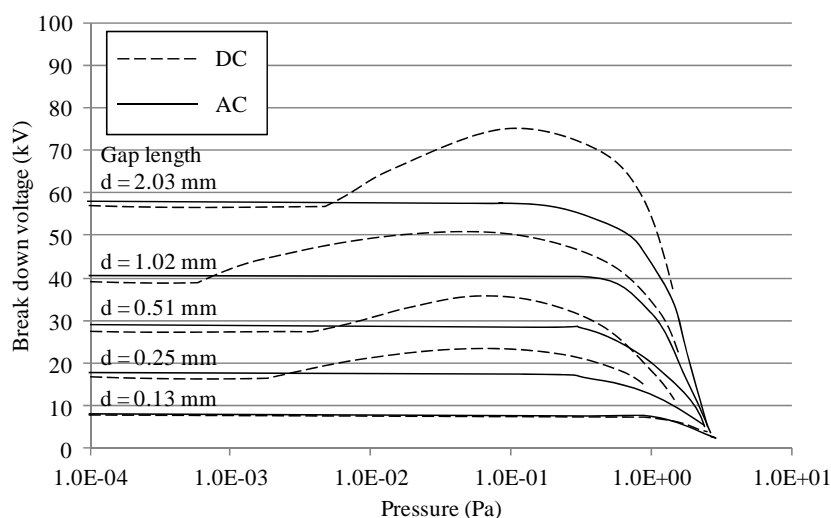


図 5 平行平板銅電極における直流放電電圧の圧力依存性[7][10]

低圧力大気中での放電電圧(Break down voltage)の実験データの一例を示す。パッシェン曲線の左側に相当する。高真空中では放電電圧は一定となる。

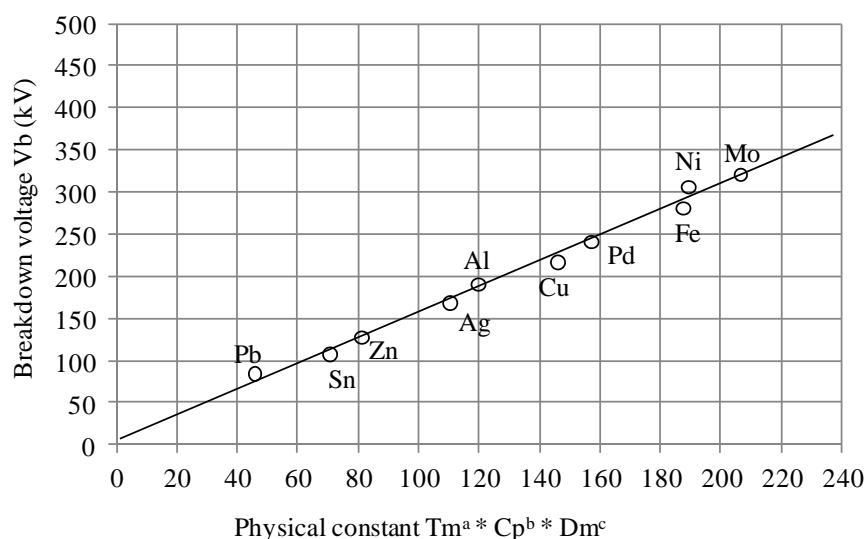


図 6 陽極材料と破壊電圧の関係[7]

様々な陽極材料に関して、融点 T_m 、比熱 C_p 、比重 D_m に対して、絶縁破壊電圧 $V_b = A \cdot T_m^a \cdot C_p^b \cdot D_m^c$ が成立することを示す実験データ。直線は $A=1.56$, $a=0.77$, $b=0.53$, $C=0.29$ である。

1.2.3 コンディショニング効果

真空中では、絶縁部材や電極を大きく破壊しない放電を繰り返すと、放電電圧が徐々に高くなるという特徴がある。これは放電の起点となる電極上の突起や不純物が放電エネルギーで消滅するためと考えられている[7]。これをコンディショニング効果と呼ぶ。真空中では電極表面における吸着ガス、微小突起、不純物等が電子放出に影響を与える。したがって、複数回の放電により電極表面でガスを放出させたり、微小突起や不純物を除去あるいは蒸発させたりすること等により、放電電圧は上昇すると考えられている。その一例を図7に示す。電解研磨を施した電極と機械研磨を施した電極ではコンディショニング効果に違いが現れる。双方とも放電回数とともに放電電圧が上昇するが、表面粗さが小さい電解研磨を施した電極は機械研磨の電極より放電電圧が高く、少ない放電回数で放電電圧が飽和する[7]。

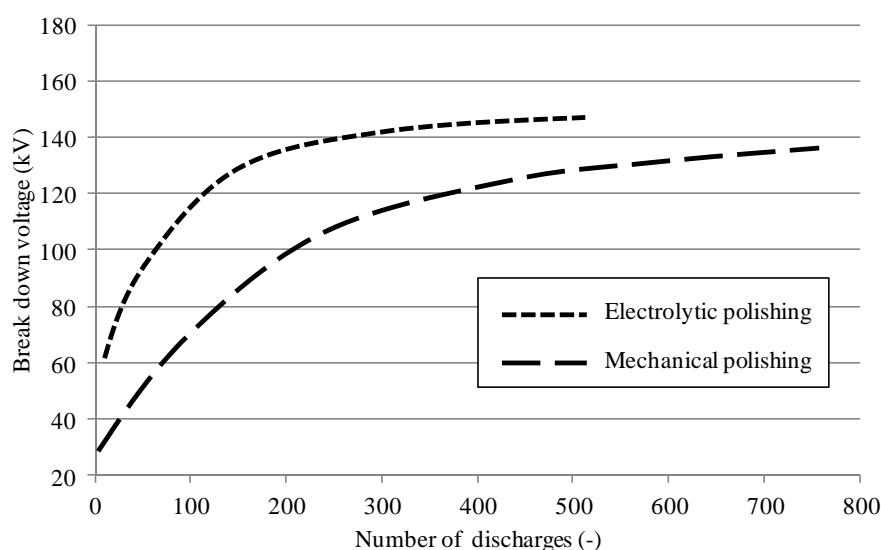


図7 電極の表面粗さを変えた場合のコンディショニング効果[7][11]

横軸を放電回数(Number of discharge)、縦軸を放電電圧(Break down voltage)とすると、真空中では放電回数が増えるに従い、放電電圧が増加する傾向がある。これは放電により吸着ガス、微小突起、不純物等が除去されるためと考えられる。表面の粗い機械研磨(Mechanical polishing)でも、放電回数が多くなるに従い、表面の滑らかな電界研磨(Electrolytic polishing)の放電電圧に近づく。

1.2.4 沿面放電

異なった2種類の誘電体の境界面に発生し進展する放電現象を沿面放電と呼ぶ。沿面放電は大気中でも真空中でも発生する。大気中での沿面放電は空気分子の電離の影響を受け、実用上は湿度や不純物の影響を受けやすいという特徴がある。一方、真空中での沿面放電は空気分子の影響がなく、電子の平均自由行程が長く、さらに水分や空気中のイオンがないため帯電電荷が中和されにくいという特徴がある。説明としては後述する三重点を放電の起点として仮定することが多い。まず、本項では大気中での一般的な沿面放電を説明し、次項にて真空中での沿面放電を説明する。

沿面放電には電界と平行に進展する電界平行型と、電界と垂直に進展する電界垂直型がある。平行平板電極間に絶縁体を置いた場合には、放電は電界とほぼ平行に進展するため、電界平行型である。図 8 に平行平板電極間において、絶縁体表面を進展し両電極間を短絡する電圧である沿面フラッシュオーバー電圧と、大気中を短絡する電圧である火花電圧の比較を示す。

大気中において、沿面フラッシュオーバー電圧は電極間の火花電圧の約 1/2 である[12]。沿面放電は電極と絶縁体の接する面の外縁部、すなわち電極、絶縁体、空気が接する箇所を発端として放電を開始する。この点を三重点と呼ぶ(物質の三重点とは異なる)。

図 8 の左上に示す三重点では、絶縁体の有無や誘電率によらず、電界は電極間のどこでも縦方向ベクトルでその値は一樣であるはずである。しかしながら、絶縁体が電極と接する面の端部は直角として製作しても、ミクロに見れば必ず端部が面取りされた形状であり、直角にはならない。

そのような実際の三重点を模擬した 2 次元電界解析結果の一例を図 9 に示す。ミクロに見ると絶縁体の端部は直角ではなく 45° の面取りがあるとした。電界解析では空気の比誘電率を 1、絶縁体の比誘電率を 5 とした。

図 9 の左側の全体図では電極間の電界は一樣であるが、右側の拡大図では絶縁体と電極の間のくさび状の空間部分に等電位線の曲がりが生じ、電界集中が見られる。この電界集中が電極からの電子放出を促進し、沿面放電の発端となることが多い。

ここでは空気中での沿面放電について述べた。空気中と真空中では電界分布に大きな差はないが、真空中では帯電等の現象が顕著となる。これについては次項に述べる。

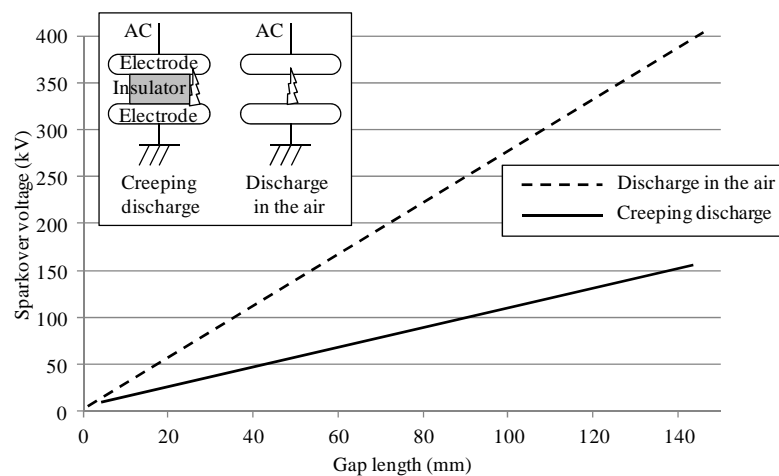


図 8 平行平板電極間の沿面放電電圧と火花放電電圧[12]

絶縁体表面に沿った放電(沿面放電, Creeping discharge)と大気中を短絡する放電(Discharge in the air)の比較を示す。横軸を電極間距離 (Gap length), 縦軸を火花放電電圧(Sparkover voltage)とすると、沿面での放電電圧は大気を短絡する放電電圧の約半分である。

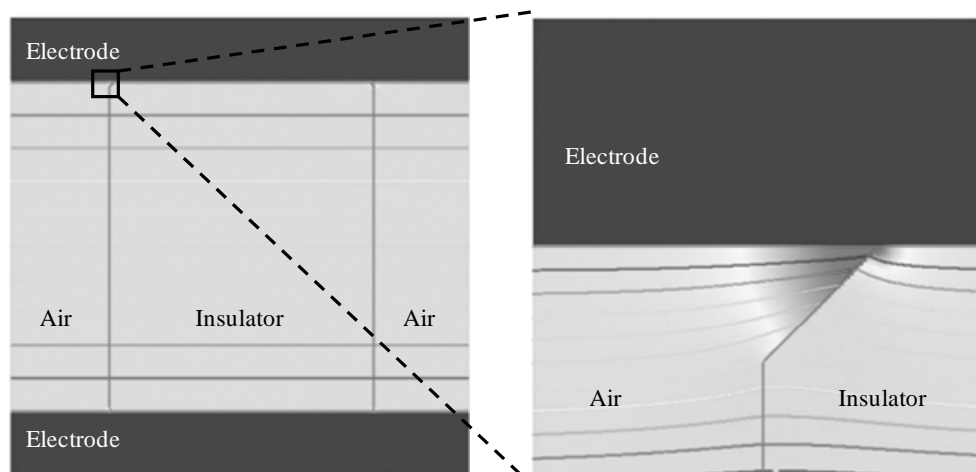


図9 2次元電界解析による三重点付近の電位分布(左：全体，右：拡大)

比誘電率 5 の絶縁体を平行平板電極間に挟んだ場合の電界解析結果を示す。絶縁体を面取りしたくさび状の空気の部分で等電位線が曲がり，電界が集中している。

1.2.5 真空中の沿面放電

真空中の沿面放電も三重点での電界集中に伴う電子放出が発端になりやすい。真空中では空気分子が少なく，電子の平均自由行程が長く，電界により一旦加速された電子は大きなエネルギーになる。加速された電子が絶縁体表面に衝突すると二次電子を発生させたり，電子が絶縁体表面に吸着されたりし，絶縁体表面を正あるいは負に帯電させる。図 10 にその概念図を示す。

電子の放出点を陰極と絶縁体の接合部の微小な隙間である三重点とする。前項で述べたようにこの隙間には非常に高い電界が存在し，電子が電界放出される。図 11 にその概念図を示す。放出された電子は絶縁体の表面へ衝突を繰り返しながら，陽極に向かって加速される。加速された電子はエネルギーが高く，絶縁体に衝突すると二次電子を発生し，電子の数は増倍するとともに，絶縁体表面は正に帯電する。二次電子が増倍する現象を二次電子なだれ(SEEA, Secondary Electron Emission Avalanche)と呼ぶ。1 個の電子の衝突により発生する二次電子の個数は二次電子放出係数と呼ばれ，物質により異なり，衝突する電子のエネルギーにより概ね図 12 のような傾向を示す。二次電子放出係数の測定結果の典型例[13]を表 1 に示す。衝突する電子の初期エネルギー E が低いと二次電子放出係数 δ は 1 以下であり，二次電子の個数は衝突する電子の個数より少ない。 E が大きくなるに従い二次電子放出係数 δ は増加し，最高値となるが，さらに E が大きくなると δ は減少する傾向がある。

二次電子放出係数が 1 以上の領域に相当するエネルギーを有した電子は絶縁体との衝突により 1 個以上の二次電子を発生させ，絶縁体は正帯電する。正帯電が進展すると，発生した二次電子がクーロン力により正帯電部分に引き戻される力が大きくなり，陽極に向かう電子は減速される。したがって，この二次電子なだれはある平衡状態に達する[9]。

二次電子放出係数が 1 以下の領域に相当するエネルギーを有した電子では，上記と逆の現象が発生し，二次電子が発生せずに負帯電となるが，電子が負帯電部分と反発する力が大きくなり，やはり平衡状態に落ち着くことになる。

上記のように、理論的には二次電子なだれが平衡状態に落ち着くとこれ以上に電子や帯電が増えることがなく、電極間を短絡するフラッシュオーバ等の沿面放電には至らない。しかし、絶縁体表面には吸着した気体が存在し、二次電子なだれの電子によって脱離した気体分子により低真空の層が形成され、この層が図 13 に示すように圧力が 1Pa 以上であれば放電電圧が下がり、さらにこの低真空の層が十分に広ければ電極間を短絡するフラッシュオーバが発生する。このフラッシュオーバが真空中の沿面放電の最終形態である。したがって、絶縁体の帯電と沿面放電は密接な関係がある。

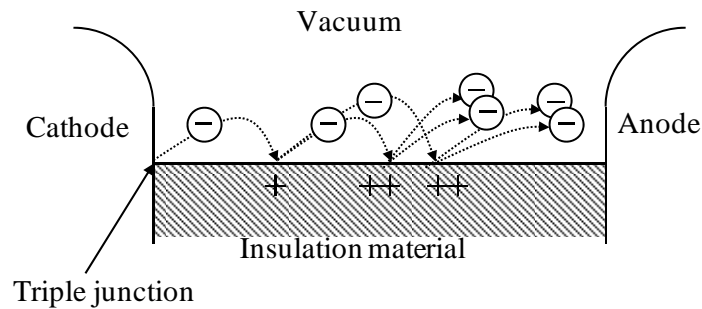


図 10 絶縁体表面の帯電を伴った二次電子発生

陰極(Cathode)と絶縁体(Insulation material)が接する三重点(Triple junction)から発生した電子は絶縁体に衝突すると二次電子を放出しながら陽極(Anode)に向かって移動する。同時に絶縁体には正帯電が発生する。

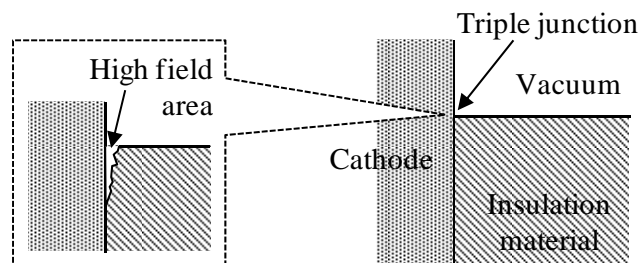


図 11 三重点

陰極(Cathode)と絶縁体(Insulation material)が接する箇所を三重点(Triple junction)と呼ぶ。ミクロには絶縁体(Insulation material)のエッジ部がくさび状の空間があり、陰極に電圧を印加すると高電界部(High field area)が発生する。

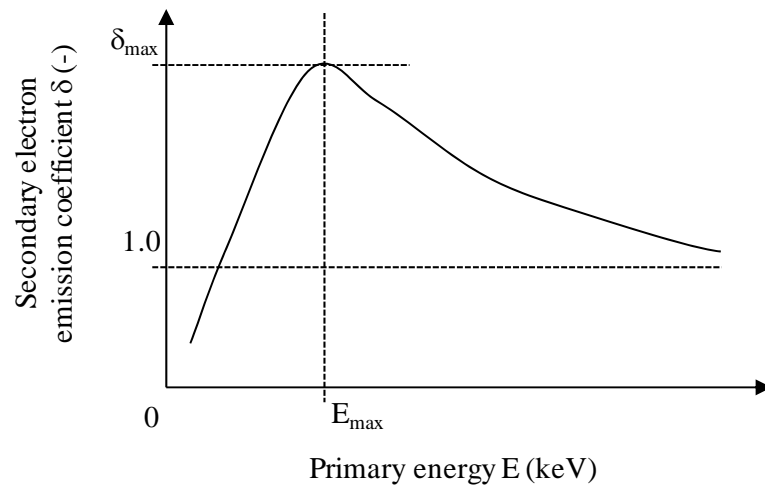


図 12 二次電子放出係数の典型例

1 個の電子が物質に衝突した際に発生する二次電子の平均個数を二次電子放出係数 δ (Secondary electron emission coefficient)と呼ぶ。衝突する電子の初期エネルギー E (Primary energy)が低いと δ は 1 以下であり、二次電子の個数は衝突する電子の個数より少ない。 E が大きくなるに従い δ は増加し、最高値となるが、さらに E が大きくなると δ は減少する傾向がある。

表 1 絶縁体の二次電子放出特性の例[13]

δ_{\max} は二次電子放出係数の最大値を示す。 E_{\max} は δ_{\max} のときの電子のエネルギーである。

Material	δ_{\max} (-)	E_{\max} (keV)
SiO ₂	~4	~0.5
Al ₂ O ₃	~8	~2.0
MgO	~8	~1.0

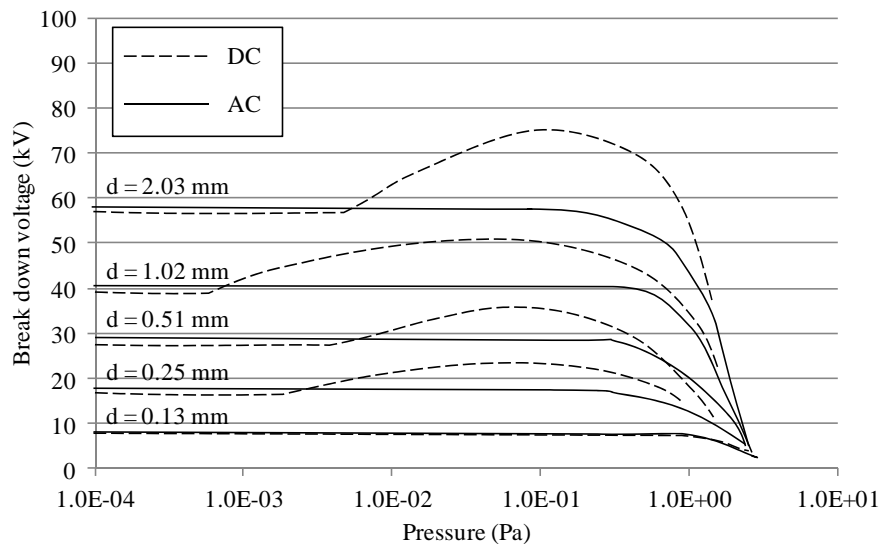


図 13 平行平板銅電極における放電電圧の圧力依存性[7][10](図 5 の再掲)

1.2.6 課題

一般的に、真空中の固体絶縁体での沿面放電電圧は、真空を介した電極間の放電電圧より低くなることが多い。このことは真空絶縁機器の耐電圧は電極を支持する絶縁部材の性能によって決まることを意味する。したがって、真空絶縁機器の高電圧化による高性能化、絶縁距離短縮による小型化、絶縁体の長寿命化等を実現するためには、真空中の沿面放電現象を解明する必要がある。

沿面放電現象は非常に複雑な現象であるが、解明のアプローチはいくつかの方法が考えられ、下記のように A)～C)に分類した。

- A) 放電現象そのものの解明：沿面放電電圧，放電の進展，コンディショニング効果等，放電現象そのものの観測
- B) 放電に影響を与える物性的効果：放電電圧に影響する吸着ガス，微小突起，不純物の影響の測定
- C) 放電に影響を与える電氣的効果：放電および帯電により絶縁体に作用する電界の影響の定量的評価

これらのうち，A)については，放電そのものは非常に短い現象であるので測定が困難であるが，過去に多くの測定がなされており，参照できるデータは多い。

B)についてはパラメータが非常に多く，また，測定が困難である項目が多いものの，ベーキングやコンディショニングによる放電電圧の向上がなされており，絶縁信頼性確保の観点からは一定の成果が得られていると言ってよい。

本研究では C)に着目した。X 線管，電子顕微鏡，イオンビーム装置，電子線描画装置，加速器，ブラウン管，真空管等の電子・荷電粒子ビーム応用機器については，絶縁体の放電電圧がその性能を左右し，さらには帯電がビームの偏向や微小放電等に関するビームの質に影響を与える。帯電と沿面放電電圧の関係を明らかにすることは重要な課題である。

1.3 研究経過

Weltzer[14]や川田[15]によれば、絶縁物自体の形状を変えることにより真空中での耐電圧性能を向上できることを報告している。山本らの研究[16][17][18][19]によれば、絶縁物自体の形状を変えなくとも、絶縁物表面を粗面化すると真空中での耐電圧性能が向上するとしている。

真空中の絶縁体の帯電を評価した研究もあり[20][21][22][23][24]，さらに積極的に絶縁体の帯電を低減するため、低めの抵抗率の絶縁体を採用するという研究もなされている[25]。これらの研究経過から判断すると、真空中での放電現象の解明や真空絶縁機器の性能向上のためには、絶縁物の帯電の状況を観測することは重要である。

先行研究では絶縁体の絶縁体表面の帯電と放電の相関について、定量的評価を行った例は見当たらず，特に帯電と絶縁体表面の粗面化による耐電圧性能向上について定量的評価が必要である。

1.4 本研究の目的

本研究では真空中での放電現象の解明や，真空絶縁機器の性能向上を目指し，真空中の固体絶縁物の電位を計測する装置を開発し、その応用として，X線管の絶縁体を想定してガラス表面に微小な凹凸を付けて粗面化した場合の表面電位分布を測定し，絶縁体の沿面放電と帯電の関係を明らかにすることを目的とする。目的の詳細を下記に述べる。

(1) 真空中表面電位計測装置の開発

真空中において絶縁体に電圧を印加した場合の帯電の分布を測定するため，非接触表面電位計を用いた計測装置を開発する。絶縁体の沿面放電と帯電の関係を明らかにするには，絶縁体をあらかじめ帯電させ，そこに電圧を印加し放電電圧を測定する方法を採用する。

あらかじめ帯電させる方法については，下記の方法が挙げられる

- a) 絶縁体に電子ビームを照射し直接帯電させる方法，
- b) X線や紫外線等の照射による光電効果を用いて帯電させる方法，
- c) 絶縁体に沿面放電を発生させ帯電させる方法

b)については十分な知見がないことから断念し，a)については計測装置の構造が複雑になりすぎ高電圧印加時の絶縁が確保できない可能性があることから準備工事にとどめることとした。そこで，今回はc)による帯電方法を採用した。1.2.5に述べたように電子などにより帯電が発生することは知られているが，帯電分布を定量的に制御することが難しい。しかしながら，簡単に帯電を発生させられること，装置の構造が簡単になることから，この方法を採用した。このように，沿面放電で帯電を発生させた後，帯電分布を測定し，さらに放電を測定するという手法は他に類例が見当たらない。

開発した装置には直流電源を備え，上記のような帯電や沿面放電を発生可能とし，真空中での帯電分布と沿面放電を測定できる装置を開発することとした。装置の詳細については次章の詳細を述べる。

(2) 帯電分布と沿面放電の測定

帯電分布と沿面放電の関係を明らかにすることを目的とし，開発した計測装置を用いて測定を行う。帯電を発生させるにはあらかじめ沿面放電を発生させればよいが，電極付近でごく僅かな電荷の移動が発生するのみの部分放電(微小放電，マイクロ放電)と高電圧電源の電流リミッタが作動するような大きな放電は帯電の様相が異なると考えられる。前者と後者の双方の帯電分布を測定することにするが，前者は長時間の低電圧の印加による部分放電させて帯電させる方法とし，後者は高電圧電源の電流リミッタが動作するまで電圧を上昇させて，比較的大きな放電で帯電を発生させる方法を採用した。

2. 真空中表面電位計測装置の開発

この章では新たに開発した真空中表面電位計測装置を説明する。この装置は真空中での試料への電圧印加と帯電電位の計測を目的とし、電圧印加用として直流高電圧電源、帯電電位計測用として非接触表面電位計、および真空容器を備える。非接触表面電位計のプローブは真空中で任意に移動でき試料の表面電位を自動的に測定可能である[26][27][28]。以下に装置の詳細を説明する。

2.1 装置の概要

開発した真空中表面電位計測装置を図 14 に、測定部の概略図を図 15 に示す。本装置は真空中での固体絶縁体の帯電に関する実験を行うため、下記の特徴を有する。

- ① 非接触表面電位計による真空中での帯電電位計測： 測定電圧 $\pm 20\text{kV}$
 - ② 絶縁体表面を計測する電位計プローブの移動機構： 最大移動距離 60mm
 - ③ 実験状況を観測できるガラス製真空容器： 最高到達真空度 $3 \times 10^{-4}\text{Pa}$
 - ④ 直流高電圧電源による試料への電圧印加： $\pm 200\text{kV}$
 - ⑤ 電位計の移動制御と電位計測の自動記録： PC による制御システム
- 次項以降にこれらの詳細を説明する。

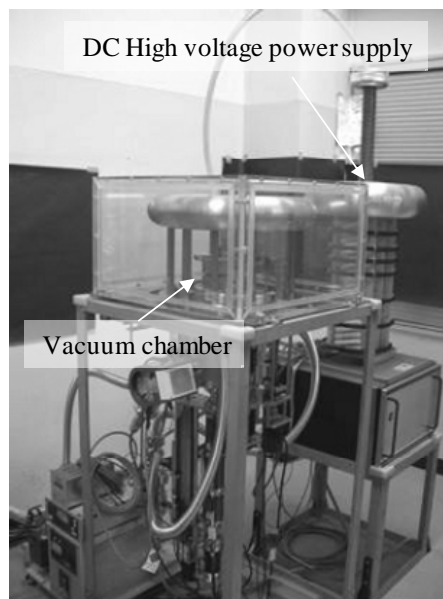


図 14 真空中表面電位計測装置

前方は真空中での試料の電位を計測する真空容器 (Vacuum chamber)をはじめとした計測部，後方は $\text{DC} \pm 200\text{kV}$ を発生する直流高電圧電源(DC High voltage power supply)である。

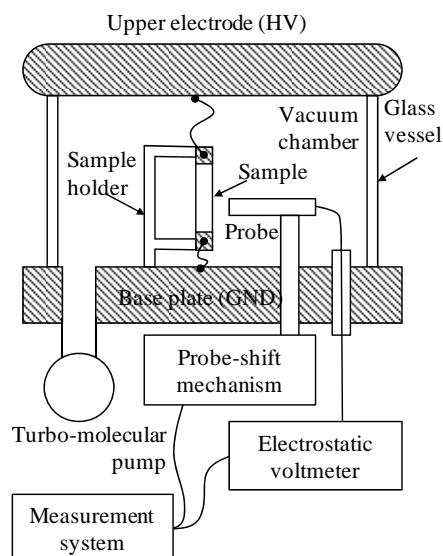


図 15 真空表面電位測定装置の測定部概要図

計測部は真空容器(Vacuum chamber)，表面電位計(Electrostatic voltmeter)，プローブ移動機構(Probe-shift mechanism)等から構成される。

2.2 表面電位計

一般的に電位を計測するためには電圧計の端子を接触させればよい。しかし，絶縁体の帯電において電位は高いものの電荷は非常に小さく，一般的な電圧計を用いた場合には電圧計の有限のインピーダンスにより電圧計を介した回路で漏れ電流あるいは充電電流が流れる。したがって，測定対象の電位と電荷が変化してしまうため，この方法では正確な電位を測定できない。

そこで，本装置では図 16 に示す非接触型の静電電位計(TREK JAPAN 製 Model341B，測定可能電位 $\pm 20\text{kV}$)[29]を採用することとした。静電電位計はラック収納可能なコントローラ部とプローブから構成され，プローブの寸法はおよそ $10 \times 10 \times 70\text{mm}$ の角型であり，内部の測定電極はプローブに設けられた直径約 2mm の観測窓を通して測定対象の電位を測定する。

図 17 に非接触表面電位計の回路概要と動作原理を示す。このタイプの電位計は非接触型であるため測定対象物は電位計とは高インピーダンスで絶縁される。さらに，測定対象物と振動する測定用電極との間の変位電流がゼロとなるよう，プローブの印加電圧を高速でフィードバック制御し，プローブ電位を測定対象物の電位と合致させる方式[29]である。したがって，プローブの電位が測定対象物の電位であり，正確な電位を測定できる。非接触表面電位計の動作原理は以下のとおりである。

- ① 発振器によってピエゾ素子を取り付けた音叉を振動させる。
- ② プローブと異なる電位を持った試料と，音叉に接続した測定電極の間の静電容量は音叉の振動により変化する。
- ③ 試料と測定電極の間に電位差があると，測定電極には起電力が発生する。
- ④ 起電力を増幅し，同期検波器で検波し，積分器で積分する。
- ⑤ 積分された起電力の信号を高電圧電源にフィードバックし，プローブに直流電圧を与える。

- ⑥ 上記の①～⑤を繰り返すことにより、プローブと試料の電位が等しくなるため、電圧計の示す電圧が試料の電位となる。



図 16 非接触表面電位計

TREK JAPAN 製 Model341B, 最高計測電圧: $\pm 20\text{kV}$ 。プローブはオプション仕様の真空対応品である。ラック収納可能なコントローラ部とプローブから構成される。プローブの寸法はおよそ $10 \times 10 \times 70\text{mm}$ の角型であり、内部の測定電極はプローブに設けられた直径約 2mm の観測窓を通して測定対象の電位を測定する。

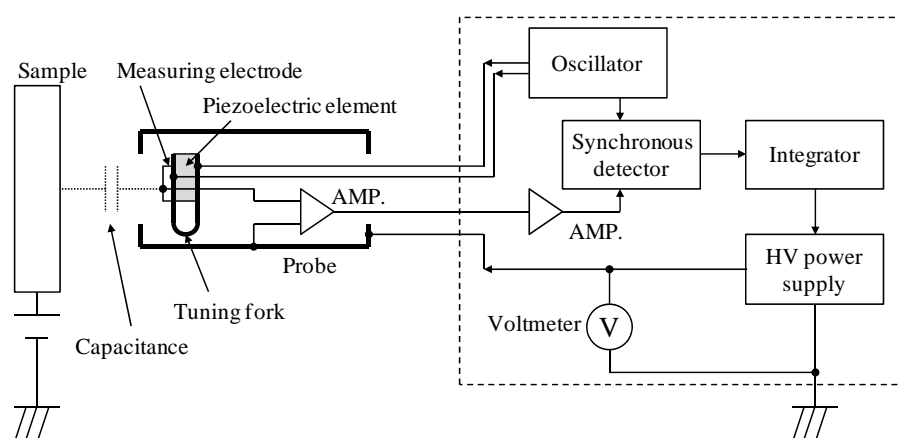


図 17 非接触表面電位計の回路概要

非接触表面電位計では、測定対象物と振動する測定用電極との間の変位電流がゼロとなるよう、プローブの印加電圧を高速でフィードバック制御し、プローブ電位を測定対象物の電位と合致させる。したがって、プローブ電位を測定すれば対象物の電位を測定したことになる。

2.3 プローブ移動機構

プローブはガラス製真空容器内に設置され、PCで制御されたプローブ移動機構により、上下方向と、中心軸に対して回転方向の移動を可能とした。幅方向が十分小さい平板状試料の場合は、円周方向の移動に伴うプローブと試料の距離の変化が小さく、双方が接触しない限りは平板状試料が測定可能である。本研究では基本的に平板状試料を測定対象とする。

本装置では上下方向の中心軸に対して最大 60mm の平行移動と、最大 70° の回転移動が可能である。図 18 にプローブの可動範囲を示す。プローブ移動機構による径方向の移動は不可能であるが、予めプローブ固定位置変えることにより、プローブの測定面を中心軸から最大 50mm の範囲で調整可能である。したがって、プローブを中心軸から半径 50mm の位置に固定した場合、円周方向には約 61mm の移動が可能であり、円筒状試料の場合は上下方向 60mm、円周方向 61mm の範囲でプローブを走査し、表面電位分布を測定可能である。平板状の試料では幅 20～30mm 程度であればプローブは試料に接触することなく測定が可能である。

プローブ移動機構は真空容器外に設置されたステッピングモータで駆動され、さらにステッピングモータは PC により遠隔制御される。プローブ位置を径方向 50mm の位置にセットした場合、上下方向および円周方向に最大約 2.5mm/s で走査し、試料の表面電位分布を測定することが可能である。プローブは高電圧となるので、絶縁してプローブ移動機構に取り付けたが、プローブ自体が帯電した場合に速やかに除電できるよう、固定用の絶縁体にはベークライト®に布を混ぜた布ベーク(公称体積抵抗率 $10^9 \sim 10^{10} \Omega \cdot \text{cm}$)を採用した。

プローブは真空対応の特注品である。プローブに付属する計測線は一旦切断した後、真空槽に取り付けた NW25 規格の電流導入端子を介して再接続し、真空槽内のプローブに動作電力の供給と計測電圧の大气中への取り出しを行う構造である。図 19 にプローブおよび周辺の構造を示す。

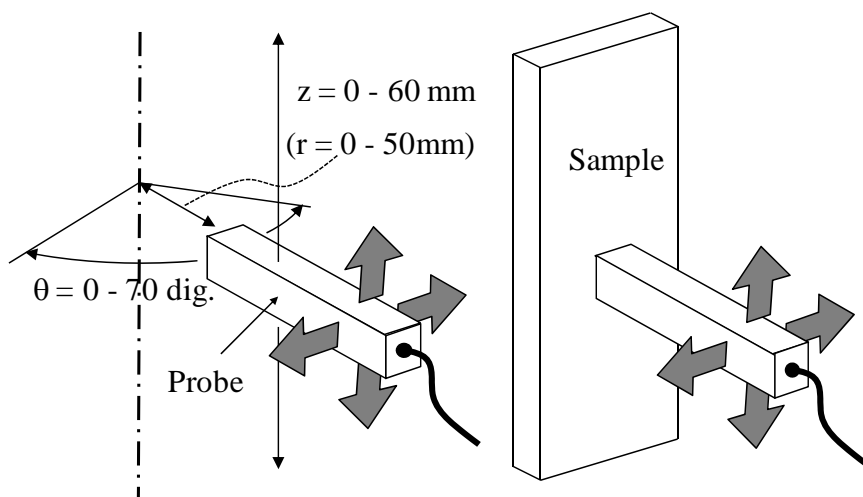


図 18 プローブの可動範囲

表面電位計のプローブ(Probe)はステッピングモータで z 方向に約 60mm、 θ 方向に約 70° の範囲内で移動可能である。幅 20～30mm の平板状試料ではプローブと接触することなく、測定可能である。

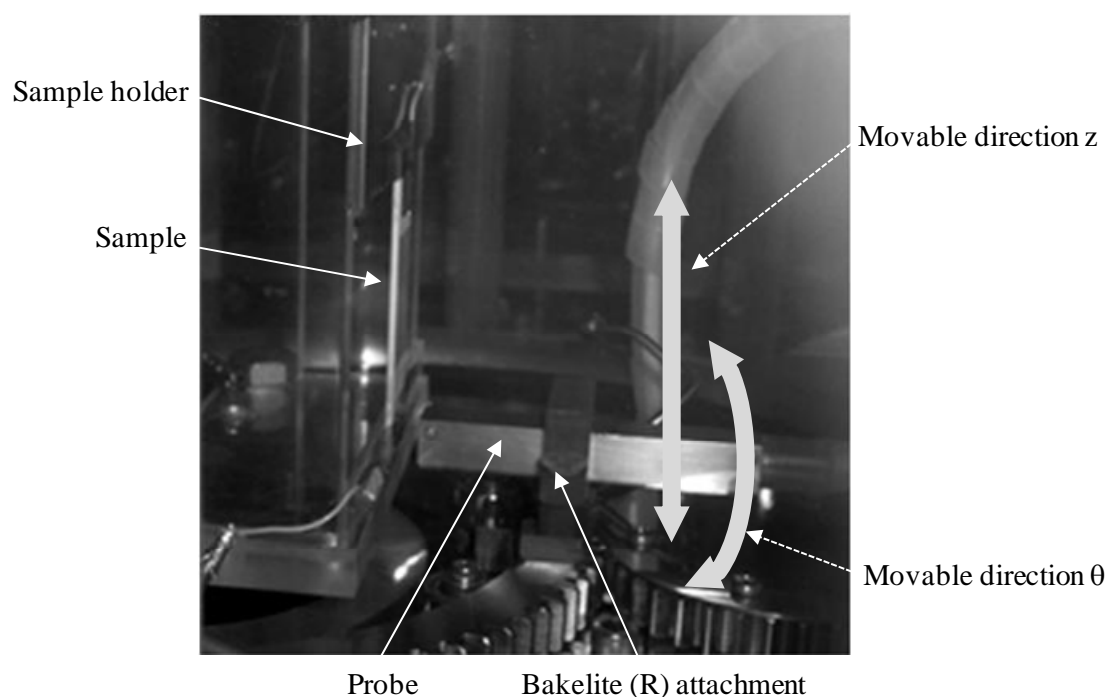


図 19 プローブおよび周辺の構造

幅 20mm の平板状試料(Sample)は試料ホルダ(Sample holder)に固定される。プローブ(Probe)は写真中の矢印の方向(Movable direction z, θ)に移動できる。

2.4 真空容器

図 20 に示すように真空容器は内部の状況を確認できるよう円筒状のガラスとし、プローブおよび試料を収納する。この真空容器にはターボ分子ポンプ (TMP) が接続され、容器内を最大到達真空度約 $3 \times 10^{-4} \text{Pa}$ に維持できる。真空容器のふたを兼ねる上部高圧電極はアルミ合金製で円筒状ガラスの上に設置する。高電圧が印加された場合に尖った箇所での電界集中により大気中でのコロナ放電が懸念される。このため、電界緩和のため、周囲をドーナツ状として曲率を持たせた。この箇所の曲率は後述する直流高電圧電源のコロナシールドの曲率と同等の曲率とし、高電圧電源の最高電圧である-200kV 印加時においてもコロナ放電が発生しないようにした。真空容器の底板はステンレス板であり、接地電位である。

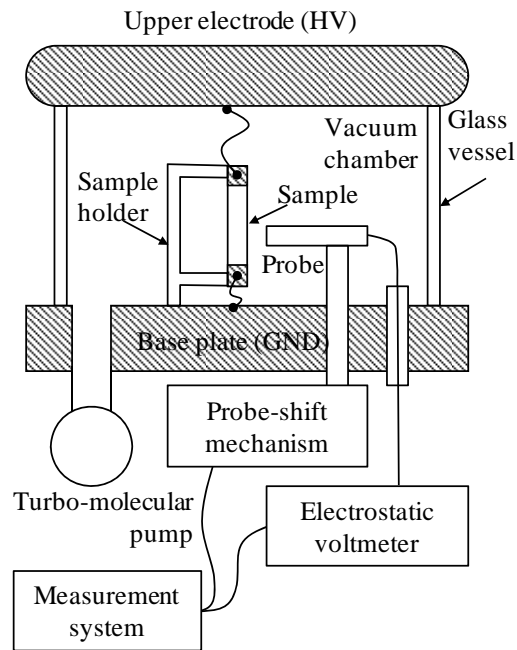


図 20 真空表面電位測定装置の測定部概要図(図 15 の再掲)

2.5 高電圧電源

直流高電圧電源(グラスマンジャパンハイボルテージ(株)製, PK200, 最高電圧 DC ± 200 kV, 最大電流 DC ± 18 mA)を図 21 に示す。電源はコントローラと本体の二つに分離しており, 本体はコッククロフト・ウォルトン回路が大気中に露出している。ドーナツ状の金属リングはコロナシールドと呼ばれる電界緩和用の部材であり, 接続端子等の電界集中部でのコロナ放電を防止する。

高電圧発生回路はコッククロフト・ウォルトン回路である。典型的なコッククロフト・ウォルトン回路を図 22 に示す。コッククロフト・ウォルトン回路は直流高電圧電源回路としてよく使われるもので, ダイオードとコンデンサのはしご状回路により交流で入力された電圧を多倍増した直流電圧を得ることができる。例えば, 図 22 に示す回路では変圧器の 2 次側電圧の 6 倍の直流電圧を得ることが可能である [9]。

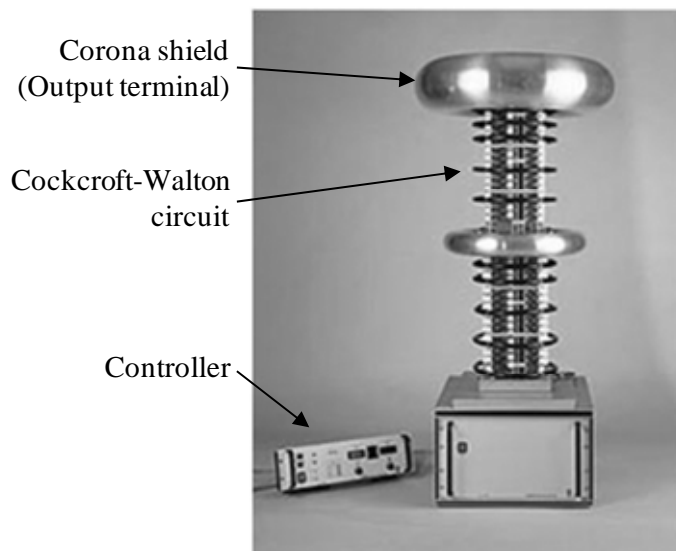


図 21 高電圧電源

グラスマンジャパンハイボルテージ(株)製の型式 PK200(最高電圧は $\text{DC}\pm 200\text{ kV}$, 最大電流: $\text{DC}\pm 18\text{mA}$)である。電源はコントローラと本体の二つに分離しており、本体はコッククロフト・ウォルトン回路(Cockcroft-Walton circuit)が大気中に露出している。ドーナツ状の金属リングはコロナシールドと呼ばれる電界緩和用の部材であり、接続端子等の電界集中部でのコロナ放電を防止する。

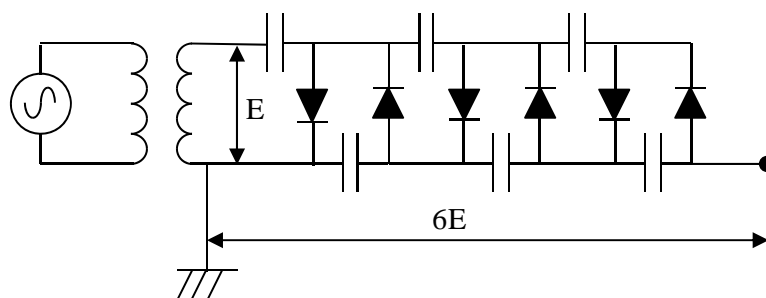


図 22 コッククロフト・ウォルトン回路

コッククロフト・ウォルトン回路の典型的な例。この例では E の交流入力に対して、 $6E$ の直流を出力可能である。

2.6 計測システム

図 23 に計測システム全体の構成図を示す。計測システムでは PC により RS-232C インタフェイスを介して、ステッピングモータを制御し、プローブを任意の位置に移動可能である。プローブで測定された電位は電位計の外部アナログ出力端子から電圧出力され、デジタルボルトメータで AD 変換した後、RS-232C インタフェイスを介して PC で記録される。同時にプローブ位置も記録される。なお、高電圧電源はリモートコントローラで遠隔手動制御できる。

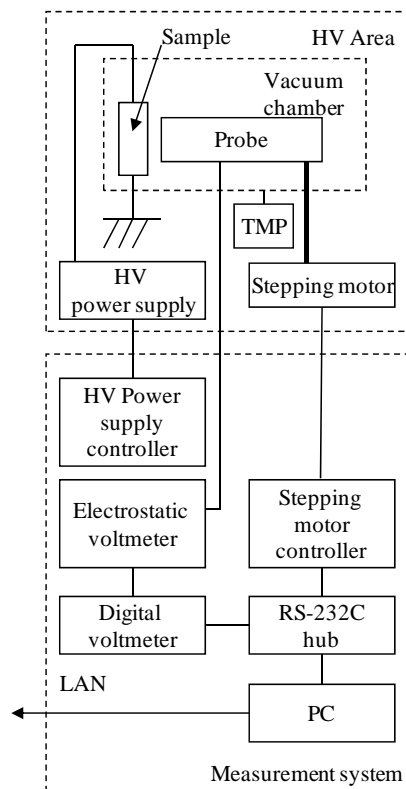


図 23 計測システムの構成

プローブ(Probe)は RS-232C インタフェイスで制御されるステッピングモータで駆動される。また、電位計(Electrostatic voltmeter)の外部アナログ出力はデジタルボルトメータ(Digital voltmeter)で AD 変換された後、RS-232C インタフェイスを介して PC で電位データとして記録される。

2.7 計測精度

計測装置の精度を確認するために、計測精度試験用試料を用いて計測試験を実施した。以下に詳細を説明する。

図 24 に計測精度試験用試料を示す。この形状は後述する帯電評価用試料と同様の形状である。平板状のホウケイ酸ガラス表面に導電性粘着剤付の銅テープを貼り付け、高圧電極、接地電極を形成した。双方の電極にはリード線を取り付け、電圧を印加できる構造である。

図 25 に試料を取り付けた真空表面電位測定装置の測定部概要図を示す。試料は試料ホルダに取り付け、真空容器内に設置した。プローブと試料表面の距離は 5mm とし、プローブは円筒状の試料表面を軸方向 (z 軸方向) と接線方向 (θ 方向) に走査できるように設置した。測定時の真空度は 10^{-3} Pa 以下である。

プローブはまず Z 方向(鉛直方向)にサンプルの中心線上を 2.5mm/s でスキャンする。その後、プローブを X 方向(水平方向)の移動した後、Z 方向にスキャンすることを繰り返す。1 個の試料の電位分布測定に要する時間は約 140 秒である。

試験結果と比較するため、電界解析を実施した。解析では試料表面の鉛直方向の電位は一様と仮定し、2次元差分法を用いて、電位分布を計算した。電極に直流-1.0kV を印加したときの試料表面の電位分布と、電界解析による電位分布を図 26 に示す。

ここでは試料の左半分のみの電位分布を示し、右側を省略している。これらからは電位分布の傾向はほぼ同じであるが、同じ位置では双方の間で 0.1kV 程度の差が見られる。

図 27 に試料の中心線上の電位分布を示す。点線は電界解析結果，実線は実測結果である。計測結果と解析結果を比較すると，ガラス表面では 0.1kV 程度の差が見られる。また，導体である電極上では電位が一定のはずであるが，実際に測定した結果では電極の端部から 5mm 程度は電位が一定ではない。これは試料と対向するプローブの表面は 1 辺約 10mm の正方形であり，さらに，2.2 に述べたプローブの測定原理ではプローブは測定対象と同じ電位になるように制御をしていることから，測定精度はプローブの大きさに依存しており，計測された電位はプローブ中心から $\pm 5\text{mm}$ 程度の電位の平均値を示していると考えられる。

以上の評価より，本装置の電位の測定精度は電極上，絶縁体上ともに $\pm 0.1\text{ kV}$ であること，電位は試料表面の $\pm 5\text{mm}$ 程度の平均値であることが判明した。したがって，局所的な電位変化は平均化されていると考えられるので，注意が必要である。

図 28 に測定装置内の平板状試料の高圧電極に -1.0 kV を印加した場合の電位分布を示す。装置の上部電極にも -1.0kV が印加されるので，試料が無い場合には装置全体で等電位線は水平方向に並行となり，電界はどこでも一定となる。試料がある場合には試料近傍では等電位線がゆがむ。しかし，試料表面では試料表面で均等に分圧され，等電位線は等間隔で大きな屈折はない。基材であるガラスの比誘電率は 5 であるが，ガラスの厚みは 2mm と薄く，装置全体に比べてスケールが小さく，電位分布にはガラスの誘電率の影響が小さい。

電位計のカタログ仕様によると，応答時間は 1kV ステップ電圧入力時が $200\mu\text{s}$ であり，仮に応答時間が線形であったとすると，10kV の測定では応答時間が 2ms である。プローブを 2.5mm/s で動かしたとしても，応答時間に対するプローブの移動距離は 0.005mm で非常に短く，精度は十分である。

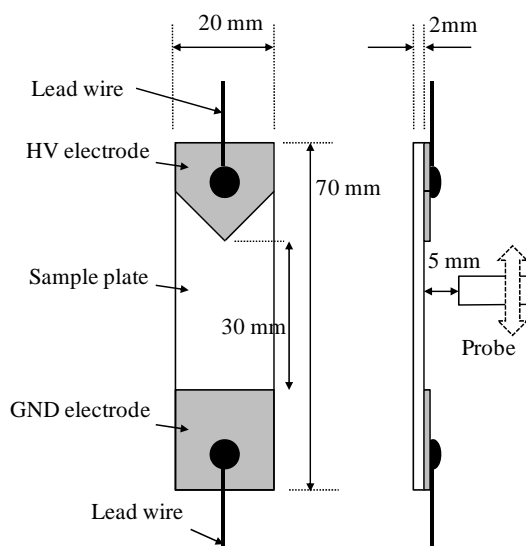


図 24 計測精度試験用試料

平板ガラス (Sample plate) に銅箔の高圧電極(HV electrode), 接地電極(GND electrode)を接着し，高圧電極のリード線(Lead wire)から電圧を印加する。

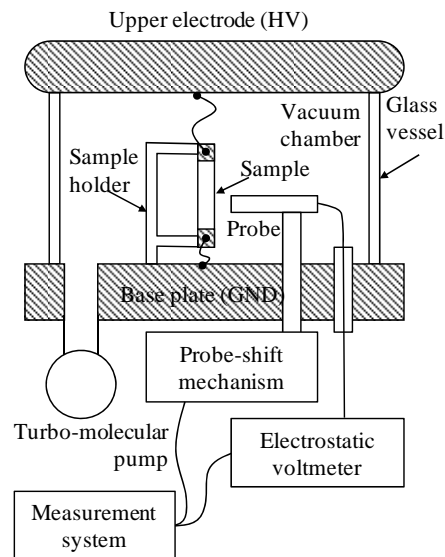


図 25 真空表面電位測定装置の測定部概要図(図 15 の再掲)

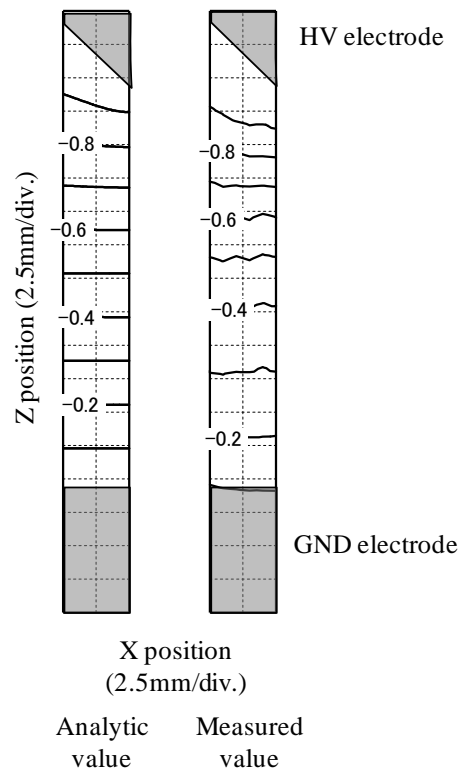


図 26 計測精度試験結果と電界解析結果の比較(二次元電位分布)

平板状試料の高圧電極(HV electrode)に-1.0 kV を印加した場合の電位分布を示す。試料の左半分だけを示す。左は 2 次元電界解析結果 (Analytic value), 右は実測結果(Measured value)である。等電位線の単位は kV である。

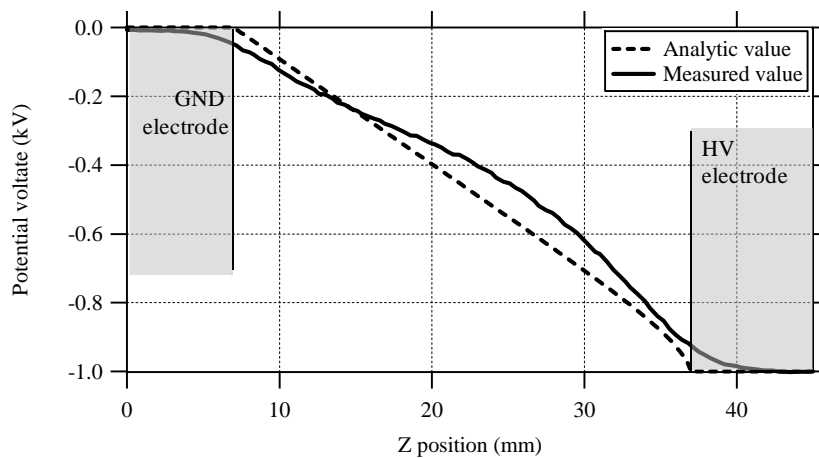


図 27 計測精度試験結果と電界解析結果の比較(中心線上の電位分布)

平板状試料の高圧電極(HV electrode)に-1.0 kV を印加した場合の試料中心軸上の電位分布を示す。点線は電界解析結果(Analytic value), 実線は実測結果(Measured value)である。

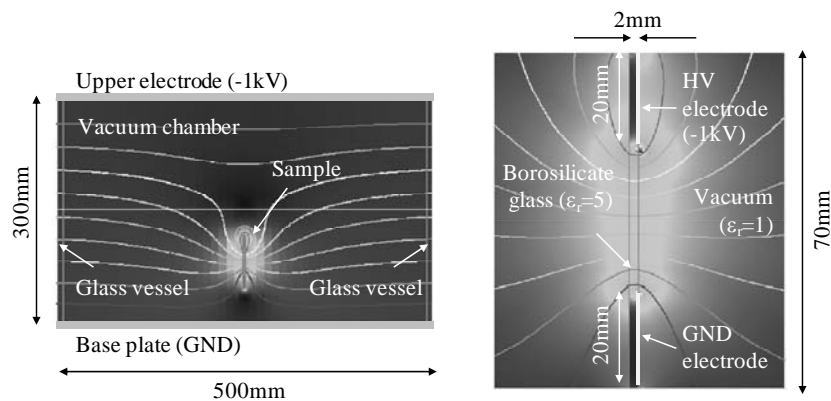


図 28 測定装置内の試料近傍の電界解析結果(左：装置全体，右：試料近傍)

測定装置内の平板状試料の高圧電極(HV electrode)に-1.0 kV を印加した場合の電位分布を示す。装置の上部電極(Upper electrode)にも-1kV が印加されるので，試料近傍では等電位線がゆがむが，試料表面では等電位線がほぼ等間隔であり，試料の誘電率の影響はない。

3. 電圧印加中における電位分布測定

この章では、板状ガラス試料の表面凹凸の有無により、電圧印加中の帯電電位分布が異なることについて報告する。凹凸による帯電の違いは顕著であり、凹凸有りの試料では無しの試料に比べて帯電による電界が半減していることが判明した[27][28]。これらについて以下に述べる。

3.1 目的

1.4 に述べたように、真空中の絶縁体では電極との界面の三重点から発生する電子により絶縁体表面が帯電すると考えられる。表面の凹凸により放電特性が異なる[17]という報告から、凹凸が帯電にも影響を与えている可能性が高いと考えられる。そこで第一ステップとして、表面に凹凸を施した板状ガラス試料に電圧を印加し、電圧を印加したまま表面電位を測定し、その特性を評価することとした。

次章で述べる測定方法では、試料に電圧を印加してから電源を OFF し、電極を接地電位にした後に表面電位を測定する。この方法では電極間電圧による電位を除くことができるので、帯電による電位分布のみを測定することが可能である。

本章では第一ステップとして電圧印加中の電位を測定するとともに全体傾向を測定し、次章では帯電の発展と減衰における時間変化について述べることとする。

3.2 測定方法

帯電電位分布と沿面放電の関係を明らかにするため、開発した計測装置を用い測定を行った。図 29 に示す板状のガラスの試料を作成し、真空中で電極間に高電圧を印加し、その際の表面の電位分布を計測した[28]。試料は大きさが 70mm×50mm×2mm の板状のホウケイ酸ガラス(パイレックス®)である。試料は表面凹凸の異なる 3 種類を準備した。試料の仕様を表 2 に示す。

試料 A はホウケイ酸ガラス板そのままを切り出したものであり、平滑な表面状態である。図 30 に試料 A の表面写真を示す。試料 A の観察像には明確な凹凸らしき像は見あたらない。

試料 B は直径数 μm のシリカ粒子を低融点のバナジウム系ガラスペースト[30]で基材であるホウケイ酸ガラス板に接着したものである。シリカ粒子、ガラスペーストおよび溶剤の混合溶液をガラス板にスプレーで噴霧し、さらに 400~500℃の熱処理によってガラスペーストが溶融し、シリカ粒子とガラス板が接着させ、試料 B を作成した。図 31 に試料 B の表面写真を示す。試料 B には直径数 μm のシリカ粒子が塊を形成し、島状に分布している。

試料 C は表面をサンドブラストで粗面化した板ガラスである。図 32 に試料 C の表面写真を示す。表面は全面にわたって凹凸が形成されている。なお、この観察像のみ走査型電子顕微鏡による観察像である。別途、光学顕微鏡にて凹凸の大きさを観測したところ、数~数十 μm であることを確認している。

試料の長手方向の両端には銀ペーストを塗布し、電極を形成した。試料 B、C については表面の凹凸を形成した後に銀ペーストを塗布している。図 33 に試料 B の光学顕微鏡により撮影した銀ペーストの端面付近の表面写真と、3 次元形状測定機能つきデジタルマイクロスコープ(光学顕微鏡, キーエンス製, VHX-100)による表面高さ分布を示す。銀ペーストの厚さは約 30 μm 程度であるが、端面に近づくに従っ

て銀ペーストが徐々に薄くなっており、その先端では電界集中により電極間の短絡に至らないような部分放電の発生が予想される。

試料は表面に付着した塵埃を除去するためエチルアルコールで洗浄している。ただし、真空中でのベーキングは装置構成上、不可能であるため実施していない。

試料の電極間に直流高電圧を印加し、試料より 5mm 離れた静電電位計のプローブを長手方向に約 2.5mm/s で走査することにより、試料表面の電位分布を測定した。測定時の真空度は 10^{-3}Pa 以下である。

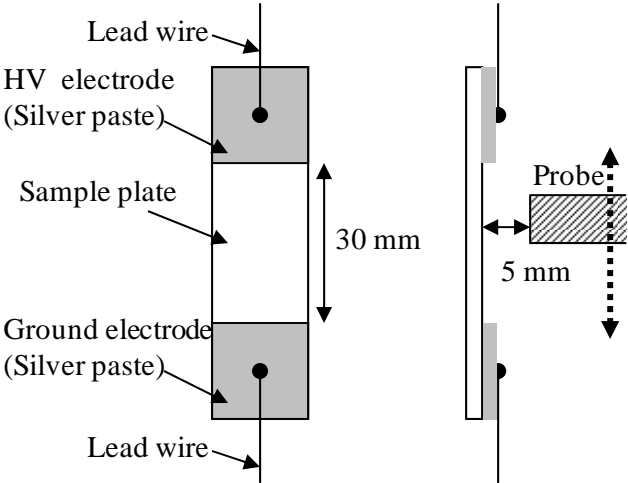


図 29 測定用試料

平板ガラス (Sample plate) に銀ペースト (Silver paste) の塗布により 高圧電極 (HV electrode)、接地電極 (GND electrode) を構成し、高圧電極のリード線 (Lead wire) から電圧を印加する。

表 2 試料の概要

試料は全てホウケイ酸ガラスである。試料 A は成型時そのままの表面、試料 B はガラス表面にシリカ粒子を低融点ガラスで接着したもの、試料 C はガラス表面をサンドブラストで粗面化し、凹凸を設けたものである。

Sample	Substrate	Roughing method
A	Borosilicate glass	No roughed (Flat surface)
B	Borosilicate glass	Adhesion of SiO ₂ particles with low-melting glass
C	Borosilicate glass	Sandblast

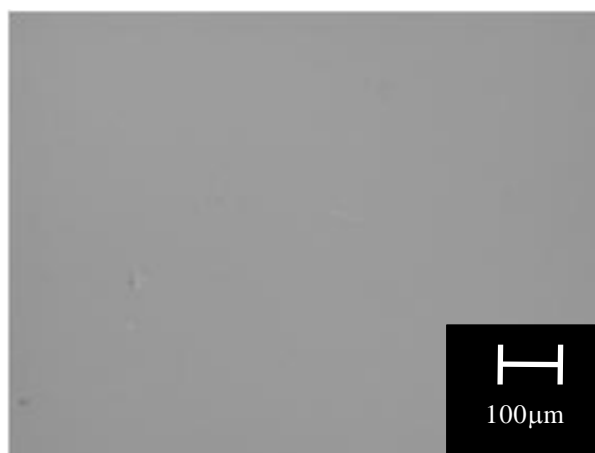


図 30 試料 A(平滑ガラス)の光学顕微鏡観察像
観察像からは凹凸は見当たらない。

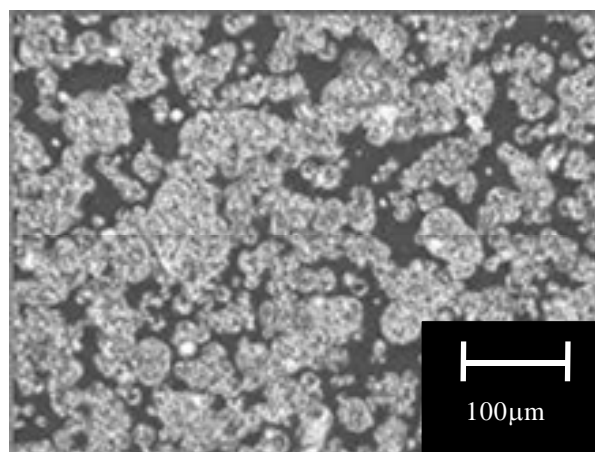


図 31 試料 B(シリカ粒子接着)の光学顕微鏡観察像
シリカ粒子, ガラスペースト等の混合溶液をスプレーで噴霧し, 400～500℃の熱処理によってガラスペーストが熔融し, シリカ粒子とガラス板を接着させた。白いシリカ粒子が島状に分布している。

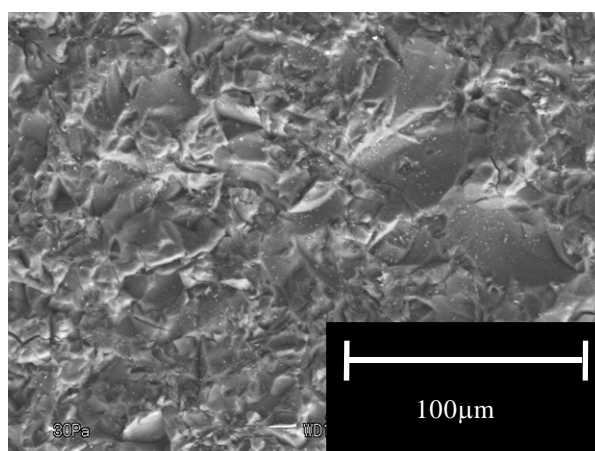


図 32 試料 C(サンドブラスト粗面化)の電子顕微鏡観察像
全面にわたって表面に凹凸がある。

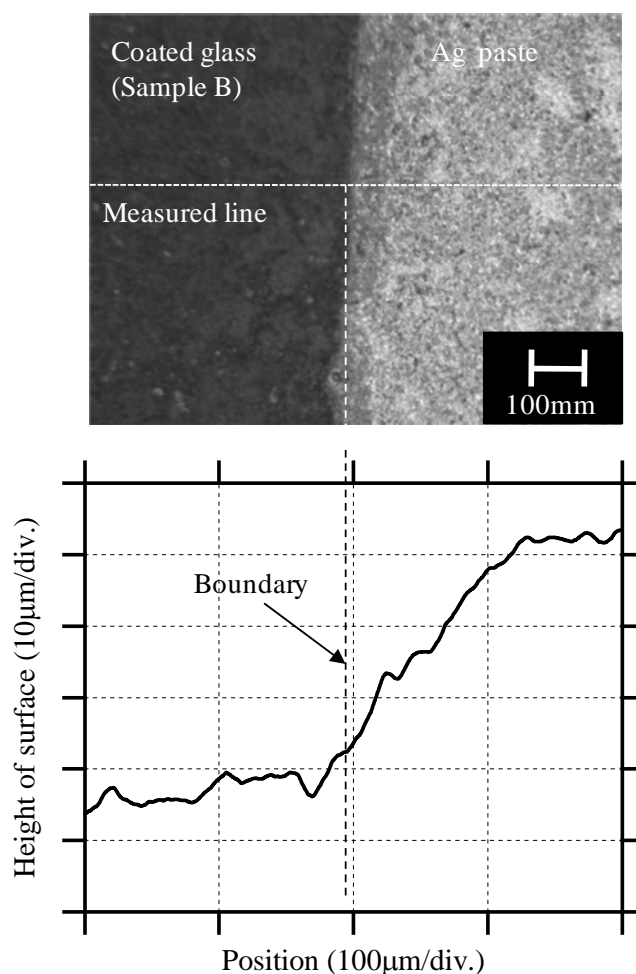


図 33 試料 B の銀ペースト電極境界面付近の顕微鏡観察像と表面高さ測定結果

銀ペースト(Ag paste)の厚さは約 $30\mu\text{m}$ 程度であるが、端面に近づくに従って徐々に薄くなっている。電圧を印加した場合、銀ペーストの先端では電界集中により電極間の短絡に至らない部分放電の発生が予想される。

3.3 測定結果

3.3.1 試料 A の電位分布測定結果

素材そのままの平滑な表面である試料 A について、真空中で直流電圧を印加した場合の表面電位分布の測定結果を図 34 に示す。高压電極には-2、-4、-10kV を約 10 分印加した。この計測結果を換算し、電界分布とした結果を図 35 に示す。なお、図 35 では便宜上、電界の正負を逆転して示している。

印加電圧が低い-2、-4kV の場合、電極間の電位分布は直線に近く、電位の傾きである電界分布もほぼ一定である。一方、印加電圧が-10kV になると、電位分布は電極間で大きく屈曲することが判明した。電位分布は正の方向に屈曲しているため、この箇所では絶縁体の正帯電が示唆される。

図 35 では電界分布にスパイク状の複数のピークが見られるが、これは別途計測の

結果、プローブの移動機構のギアの遊びによる位置検出精度の低下が原因であると判明したため、電界分布はこのスパイク状のピークを除いた値で評価することにする。

それぞれの電圧印加時における最大電界を比較すると、-2kV 印加時では約 0.07kV/mm、-4kV 印加時では約 0.16kV/mm であるのに対し、-10kV 印加時では約 0.70kV/mm まで急激に増加した。また、-10kV 印加時には高压電極側の領域で電界が増加している。

この傾向は他の試料も含め、複数の測定により再現性があることを確認している。

3.3.2 試料 B の電位分布測定結果

シリカ粒子を低融点ガラスペーストで板ガラスに接着した試料 B について、測定した電位分布を図 36 に、これを換算した電界分布を図 37 に示す。-2kV および-4kV 印加時においては、電位分布は試料 A と同様に直線に近く、電界も一定に近い。一方、-10kV 印加時においては、試料 A と比較すると電位分布の屈曲が小さく、最大電界は 0.40kV/mm に小さくなっている。

3.3.3 試料 C の電位分布測定結果

表面をサンドブラストにより粗面化した試料 C について、測定した電位分布を図 38 に、これを換算した電界分布を図 39 に示す。電位分布、電界分布の傾向とも試料 B とほぼ同様であり、-10kV 印加時の最大電界は 0.42kV/mm である。

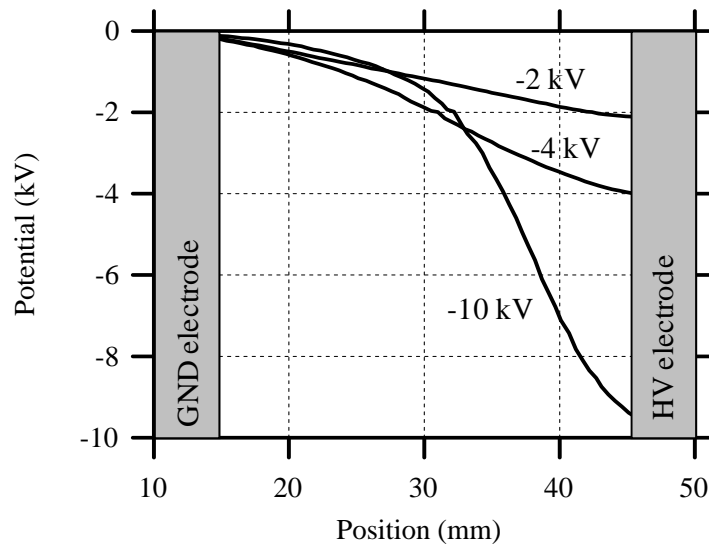


図 34 試料 A(平滑ガラス)の表面電位分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電位(Potential)を示す。
-2kV, -4kV 印加時では電位分布は直線状であるのに対し, -10kV 印加時には電位分布が屈曲していることがわかった。

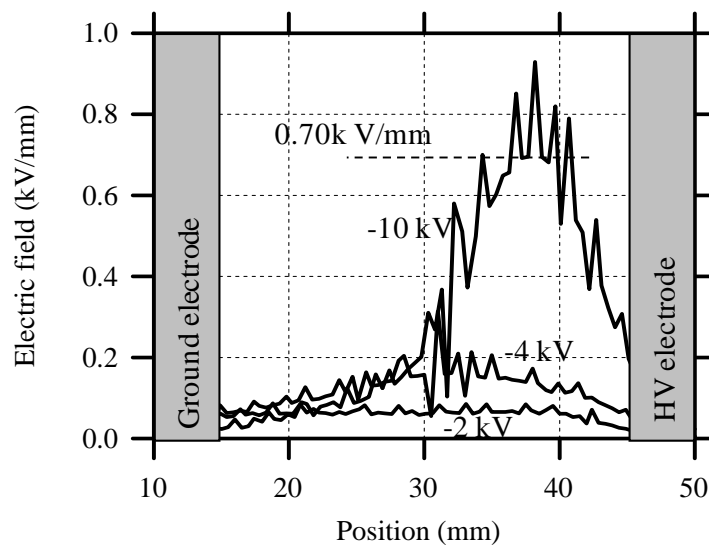


図 35 試料 A(平滑ガラス)の表面電界分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電界(Electric field)を示す。
-10kV 印加時の最大電界は 0.70 kV/mm である。

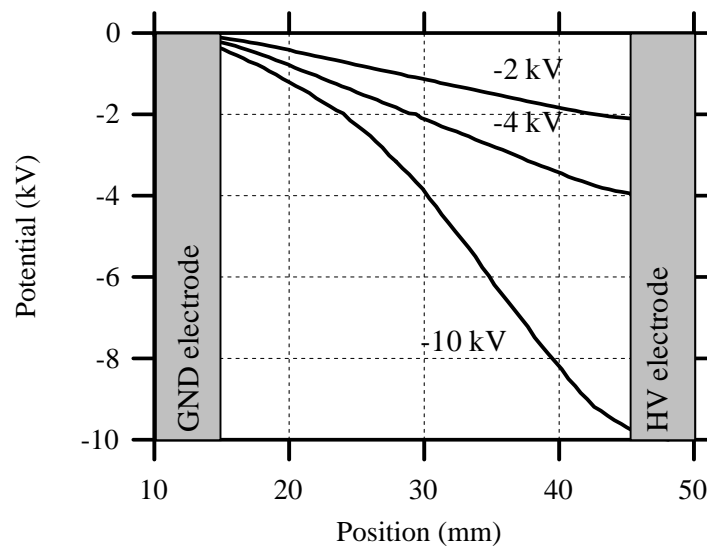


図 36 試料 B(シリカ粒子接着)の表面電位分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電位(Potential)を示す。
試料 A と異なり, 電位分布の屈曲が小さい。

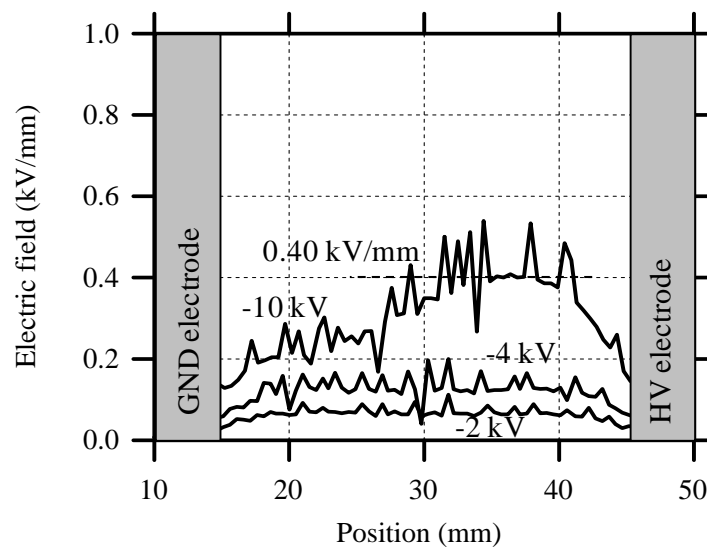


図 37 試料 B(シリカ粒子接着)の表面電界分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電界(Electric field)を示す。
-10kV 印加時の最大電界は 0.40 kV/mm であり, 試料 A より小さい。

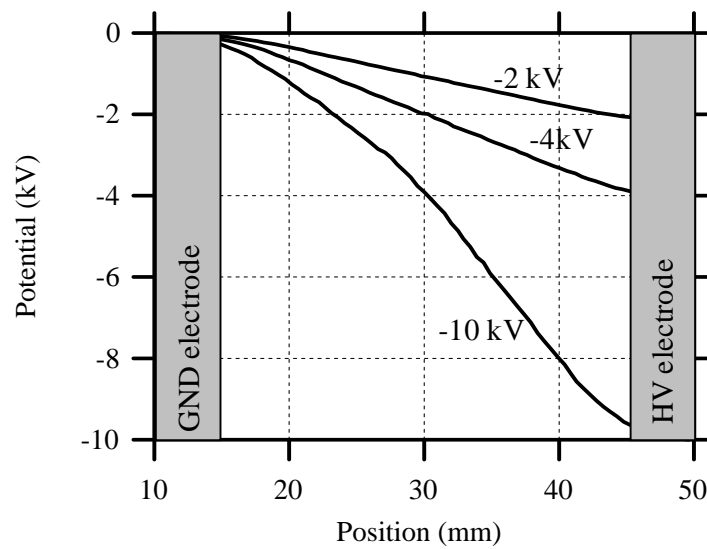


図 38 試料 C(サンドブラスト粗面化)の表面電位分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電位(Potential)を示す。
試料 A と異なり, 電位分布の屈曲が小さい。

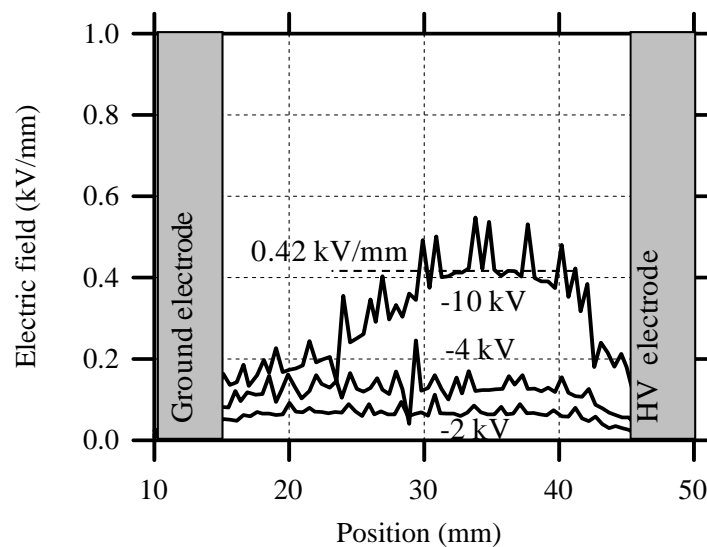


図 39 試料 C(サンドブラスト粗面化)の表面電界分布

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電界(Electric field)を示す。
-10kV 印加時の最大電界は 0.42 kV/mm であり, 試料 A より小さい。

3.4 まとめ

本章の測定結果のまとめを下記に述べる。帯電のメカニズム等の詳しい考察は第6章に述べる。

- (1) 真空中においてホウケイ酸ガラス試料に電圧を印加して、表面の帯電分布を測定した。
- (2) -10kV を約 10 分間印加したところ、平滑な試料では電極間の電位分布が屈曲する。これは屈曲のある箇所では試料が正帯電したことによると考えられる。
- (3) 凹凸を付けた試料では電位分布の屈曲の度合いが小さくなり、最大電界が小さくなる。このことより表面の凹凸は帯電を抑制する働きがあると考えられる。

4. 電圧 OFF による帯電電位分布測定

前章では電圧印加中の絶縁体の電位分布を測定し、表面の凹凸により電位分布が異なり、平滑な試料と比較すると、表面凹凸がある試料では試料中心線上での電位分布の屈曲が小さく、最大電界が緩和されていることが明らかになった。

しかし、詳細な現象の把握が不足しており、また、帯電メカニズムも明確ではない。そこで、電圧印加による微小放電が発生している状態での帯電を詳細に調べるため、新たにサンドブラストにより表面凹凸の度合いを変えた試料を作製し、表面電位分布の測定結果から、帯電メカニズムに関する考察を進める。

前章では第一ステップとして電圧印加中の電位を測定するとともに全体傾向を測定した。

本章では試料に電圧を印加してから電源を **OFF** し、電極を接地電位にした後に表面電位を測定する。この方法では電極間電圧による電位を除くことができるので、帯電による電位分布のみを測定することが可能である。さらに、帯電の発展と減衰における時間変化について、試験方法と結果について述べる。

4.1 目的

前章での試験では高圧電極付近でごく僅かな電荷の移動が発生するのみの部分放電(微小放電、マイクロ放電)が発生しており、電極からは電子が放出され、絶縁体表面が帯電していると考えられる。このごく僅かな部分放電が発生していると考えられるが、高電圧での微小電流の測定は困難であるが、高電圧電源の電流リミッタの最小設定値以下であるので、数 μA であると推測している。

絶縁体の電位分布が明らかに帯電によるものであることを確認するためには、電圧印加を止めたあとも電荷が残留していることを確認すればよい。一方、絶縁体の抵抗率が小さいと、電気伝導により帯電電荷が中和されやすく、帯電電位が抑制されることが明らかである。凹凸の生成方法によっては表面の抵抗率に影響を与えている可能性もあり、確認が必要である。

そこで、一定時間の電圧印加後に高圧電極を接地し、電極間の電位差を除いた後に試料表面の電位を測定することとした。さらに、電圧印加を止めた後の電位分布も時間変化も測定することとした。

ここでは-10 kV の印加中に 10 分毎に高圧電極を接地し、電極間の電位差を除いた試料表面の電位を測定し、帯電を直接測定する。さらに通算 60 分間の電圧印加後にも帯電分布の時間変化を測定する。この方法により、絶縁体表面の凹凸の違いによる帯電の傾向を詳細に調べ、帯電のメカニズムを考察することとする。

4.2 測定方法

4.2.1 測定試料の粗面化

試料表面の粗面化方法を説明する。前章での試験試料は **A**:平滑ガラス、**B**:シリカ粒子接着、**C**:サンドブラスト粗面化を準備したが、今回はサンドブラスト粗面化のみとした。試料 **B** のシリカ粒子の接着による凹凸形成はスプレーによる塗布過程で、シリカ粒子の密度にムラが発生しやすいため、定量的評価が難しいと判断したためである。

次章の試験にも同じ試料を用いることとし、表面の凹凸による影響を評価できるよう、測定試料は4種類を準備した。凹凸の度合いを変えるためにサンドブラストの研磨剤の粒度を#2000, #800, #280と変えて表面を粗面化処理した。本章における試験では粗面化しない試料と#280の研磨剤で粗面化した試料のみを評価するが、ここでは4種類の試料の説明をする。

4種類の試料は試料D～Gとする。試料Dはガラス成型時そのままの表面である。試料Eは研磨剤#2000(平均粒径 $6.7\mu\text{m}$)、試料Fは研磨剤#800(平均粒径 $14.0\mu\text{m}$)、試料Gは研磨剤#280(平均粒径 $48.0\mu\text{m}$)を用いて表面をサンドブラストし、粗面化している。

試料の表面凹凸は3次元形状測定機能つきデジタルマイクロスコープ(光学顕微鏡, キーエンス製, VHX-100)を用いて凹凸表面の顕微鏡観察と測定を行い、算術平均粗さ(Ra)を導出した。図50に試料の顕微鏡観察像を示す。

図50の表面観察像はデジタルマイクロスコープ(光学顕微鏡)の撮影像であり、図32に示すサンドブラスト粗面化試料Cの表面観察像は電子顕微鏡像である。また、両者ではサンドブラスト処理の方法が異なり、さらに図32に示す試料はサンドブラスト後のフッ酸処理によりガラス表面の凹凸を滑らかにしている。したがって、試料Cと試料E～Gでは像の様相が異なっている。

なお、これらの表面観察像は測定前の観察像である。測定後は顕微鏡により観察はしていないが、目視では放電痕や変質等は見当たらないことを確認している。

図51に各試料における任意位置での長さ $350\mu\text{m}$ の直線上の凹凸観察結果とその算術平均粗さRaを示す。表面粗さは試料DからGの順に大きくなっている。

表4には各試料の表面粗さをまとめる。表面の凹凸はサンドブラストをしない試料Dでは算術平均粗さRaが $0.23\mu\text{m}$ 、平均粒径 $6.7\mu\text{m}$ の研磨剤を用いてサンドブラストした試料Eでは算術平均粗さRaが $0.76\mu\text{m}$ 、平均粒径 $14.0\mu\text{m}$ の研磨剤を用いてサンドブラストした試料Fでは算術平均粗さRaが $0.95\mu\text{m}$ 、一番粗い平均粒径 $48.0\mu\text{m}$ の研磨剤を用いた試料Gでは算術平均粗さRaが $1.44\mu\text{m}$ であった。

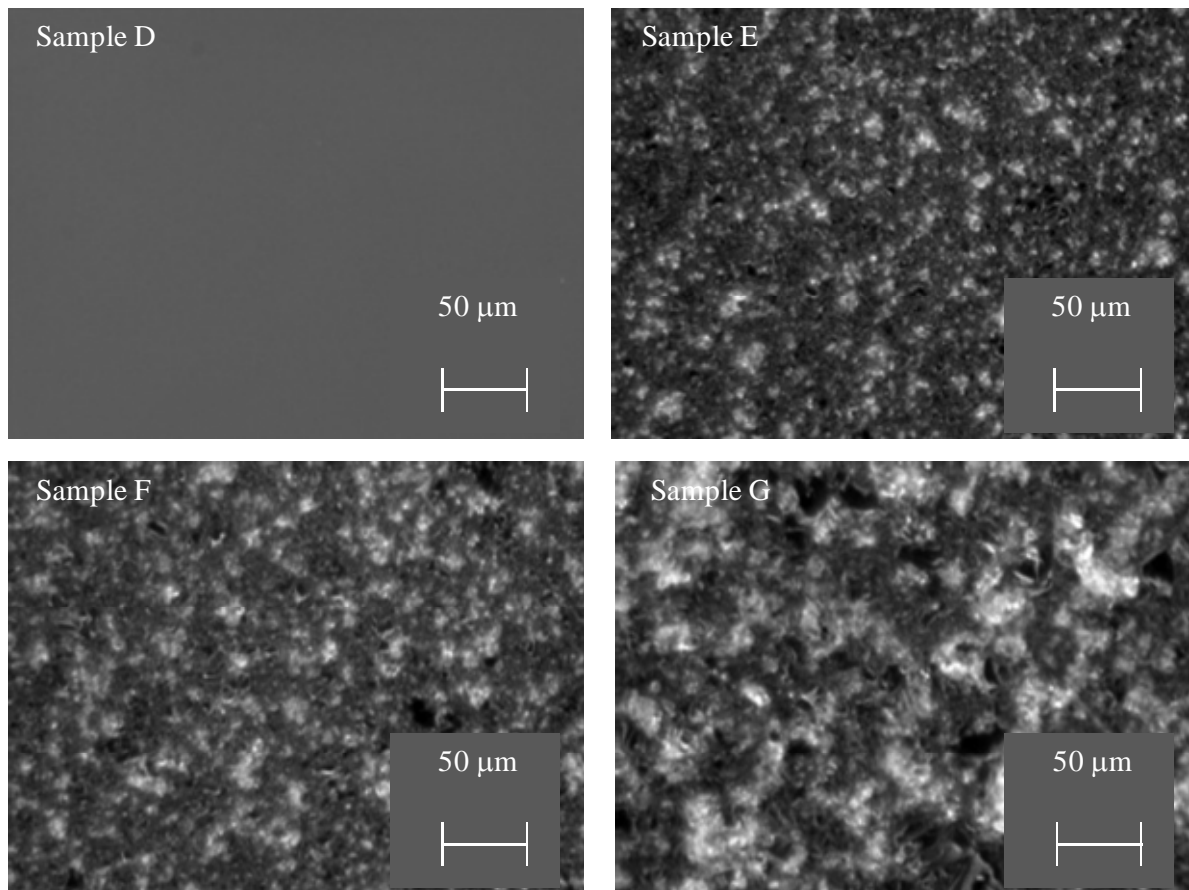


図 40 デジタルマイクロスコープ(3次元測定機能つき光学顕微鏡)による撮影像
 左上：試料 D，成型時そのままの表面，右上：試料 E，研磨剤#2000 で粗面化
 左下：試料 F，研磨剤#800 で粗面化，右下：試料 G，研磨剤#280 で粗面化

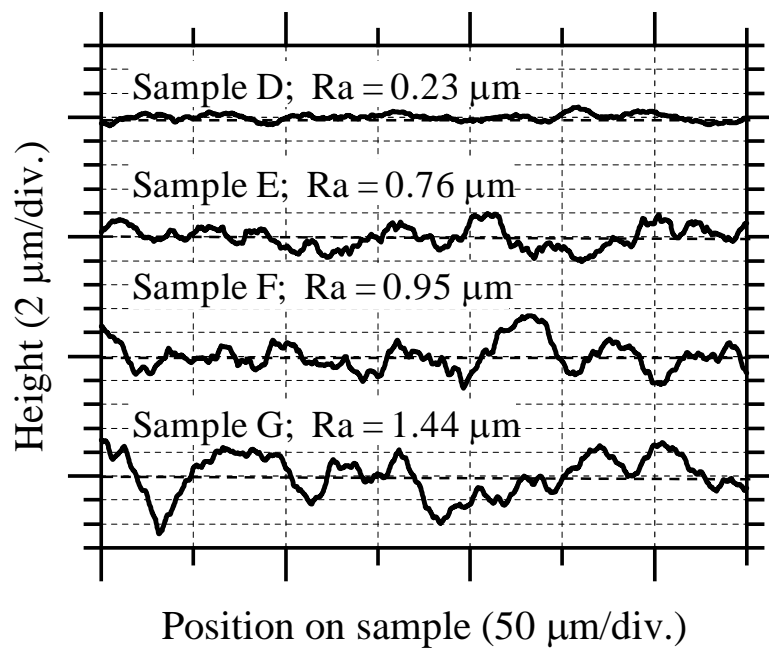


図 41 試料の表面凹凸観察結果と算術平均粗さ

3次元形状測定機能つきデジタルマイクロスコープにて帯電分布測定前に表面凹凸を測定。

表 3 試料の表面粗さ

試料 D～G について、研磨剤番号(Abrasive number)、研磨剤粒子径(Abrasive particle size)、算術平均粗さ(Arithmetic average roughness)をまとめる。

Sample name	Substrate	Abrasive number	Abrasive particle size (μm)	Arithmetic average roughness, Ra (μm)
Sample D	Borosilicate glass	Non-treated	Non-treated	0.23
Sample E	Borosilicate glass	#2000	6.7	0.76
Sample F	Borosilicate glass	#800	14.0	0.95
Sample G	Borosilicate glass	#280	48.0	1.44

4.2.2 測定試料

図 52 に測定に用いた試料の形状を示す。前章で述べた銀ペースト電極では下記に示すような懸念事項があったため、試料構成を変更した。

前章で述べた試料では電極を銀ペーストで構成した。これは銀ペーストを塗布することで表面に凹凸を付けたガラスにおいても電極を簡単に構成することができたためである。しかしながら、電極を銀ペーストで形成すると、銀ペーストの端面のどこで部分放電が発生するかわからない。

さらに、次章で述べる試験では絶縁体の表面で放電させ、帯電を生成した後、帯電電位を測定し、さらに放電させる、という一連の試験を行うため、放電は同じ箇所が発生させたい。しかし、銀ペーストの塗布により電極を構成する場合、端面形状を直線以外に変更できず、尖った電極形状にすることが困難である。

このためには、先端での電界集中がさらに大きい、尖った電極を用いることが望ましい。そこで、高圧電極は野球のホームベースのような五角形状とし、電極材料としては厚さ 70μm の導電性粘着剤付の銅テープを貼り付ける構造を採用した。高圧電極、接地電極の双方の電極にはリード線を取り付け、電圧を印加できる構造である。測定試料は測定の前にエチルアルコールで洗浄した。

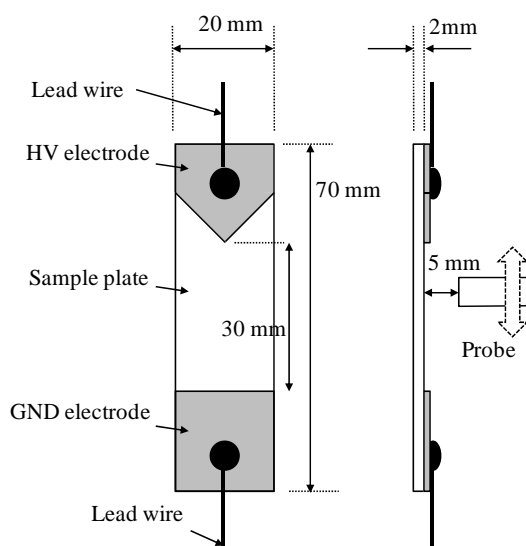


図 42 測定に用いた試料

平板ガラス (Sample plate) に銅箔の高圧電極(HV electrode)、接地電極(GND electrode)を接着し、高圧電極のリード線(Lead wire)から電圧を印加する。

4.2.3 測定方法

装置構成や試料のセッティングは前章と同様である。ただし、今回は-10kV を連続的に印加し、10 分毎に電位分布を測定し、さらに通算 60 分の電圧印加後にも電位分布の時間変化を測定することとした。試料 D と試料 G のみを測定することとし、下記の手順で試験を実施することとした。測定時の真空度は 10^{-3}Pa 以下である。

- (1) 図 19 のように板状の試料をホルダに取り付け、リード線を配線し、試料に電圧印加できる回路を構成する。
- (2) 真空層内の真空引きをする。ターボ分子ポンプで 1 日以上真空引きし、圧力 $3\sim 5\times 10^{-4}\text{Pa}$ の範囲の真空度で試験を実施した。
- (3) 電圧を手動で概ね-1kV/s で-10kV まで上昇させる。前章の放電試験の結果より、-10kV では $18\mu\text{A}$ 以上の放電は発生しないことを確認しており、放電が発生するとすれば、 $18\mu\text{A}$ 以下の僅かな電流が流れるのみである部分放電(微小放電、マイクロ放電)である。
- (1) 10 分経過後、自動接地装置を作動させ、高圧電極を接地し、接地電位とする。接地により、電極間の印加電圧による電位を消去し、試料表面の帯電による電位分布を直接測定することができる。
- (4) プローブをスキャンし試料表面の電位を測定する。
- (5) (3)～(6)を繰り返す。
- (6) 帯電の減衰特性を測定するため、通算 60 分にわたって-10kV を印加した後、高圧電極を接地し、10 分毎にプローブをスキャンし試料表面の電位を測定する。

4.3 測定結果

(1) 電圧印加中の電位分布変化

図 43 と図 44 に-10kV 連続印加時の 10 分毎の 2 次元電位分布と、60 分印加後の 10 分毎の 2 次元電位分布を示す。ここでは試料の左半分のみの電位分布を示し、右側を省略している。これらによると、試料 D、G とともに全体的に負帯電しており、試料 D は接地電極付近で正帯電が確認できる。試料 D、G とともに電位は緩やかに変化しており、X 方向(横方向)は Z 方向(縦方向)の変化より小さい。

図 45 には平滑な試料 D における中心軸上の-10kV 連続印加時の 10 分毎電位分布測定結果、図 46 には-10kV を 60 分印加後の 10 分毎電位分布測定結果を示す。さらに、図 47、図 48 には粗面化した試料 G の測定結果を示す。これらによると、-10kV の電圧印加では 60 分ほどで電位変化は飽和に近づいている。試料 D、G とともに高压電極から約 10mm(測定位置では 38mm 付近)の位置で-1.5kV 程度の負のピークとなる。試料 D では接地電極近傍で約 0.4kV の正帯電のピークが確認できる。

なお、図 45～図 48 では 0V であるはずの電極部分に電位が発生しているように見えるが、2.7 で述べたように測定電位は試料表面の±5mm 程度の平均値であり、これらは測定誤差である。

(2) 電圧印加後の電位分布変化

電圧印加後の電位分布変化を示す図 46、図 48 によると、双方とも負帯電のピークの電位は 60 分の電圧印加終了から 10 分後(70 分後)でほぼ半減、印加終了から 60 分後(120 分後)では 1/6 にまで減衰しており、双方に傾向の大きな違いはない。

真空中であるので帯電の減衰は、電気伝導による電荷の中和であると考えられる。したがって、同一形状の試料 D と G を比較した場合、帯電の減衰がほぼ同等の傾向であるため、双方の電気抵抗は同等であると考えられる。

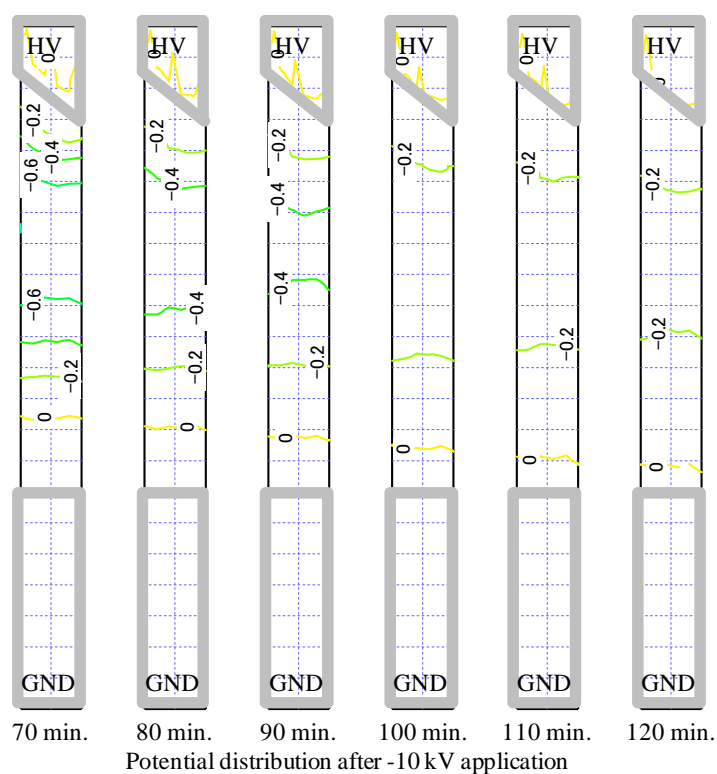
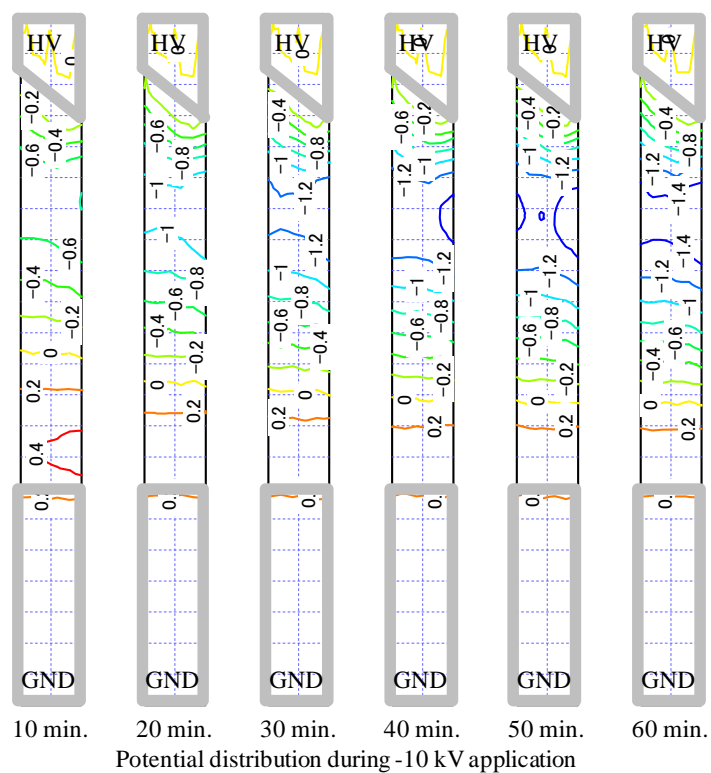


図 43 試料 D(粗面化なし, $R_a=0.23\mu\text{m}$)における-10kV 連続印加時の 10 分毎の 2 次元電位分布(上段)と 60 分印加後の 10 分毎の 2 次元電位分布(下段)

電位の単位は kV, 位置の単位は 2.5mm/div.である。全体的に負帯電しているものの, 接地電極付近では正帯電している。

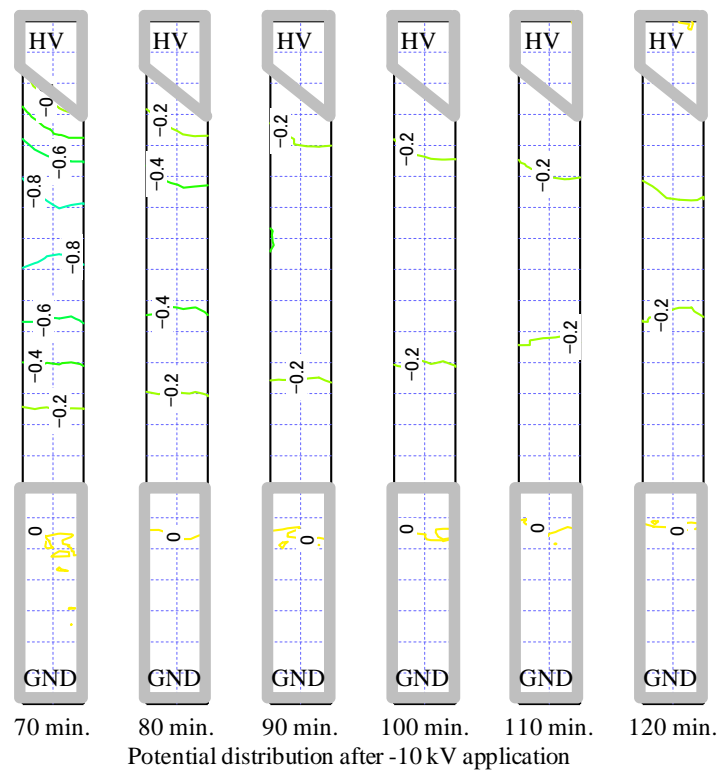
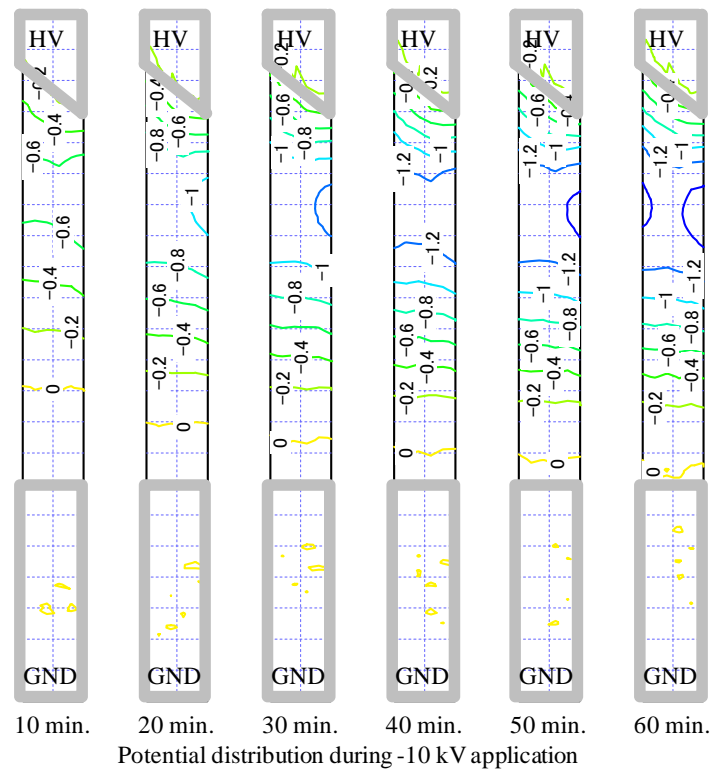


図 44 試料 G(#280 で粗面化, $R_a=1.44\mu\text{m}$)における-10kV 連続印加時の 10 分毎の 2 次元電位分布(上段)と 60 分印加後の 10 分毎の 2 次元電位分布(下段)

電位の単位は kV, 位置の単位は 2.5mm/div.である。粗面化した場合も粗面化なしの場合と同様に全体的に負帯電しているが, 接地電極付近の正帯電は僅かである。

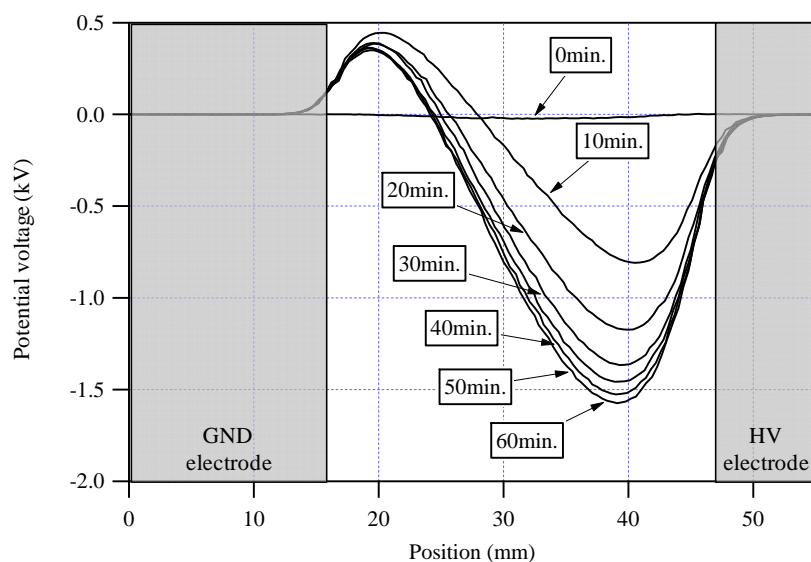


図 45 試料 D(平滑)における-10kV 連続印加時の 10 分毎電位分布測定結果

-10kV を連続印加すると、高压電極(HV electrode)に近い部分では負帯電が発生しており、接地電極(GND electrode)に近い部分では正帯電が発生している。電位は時間とともに増大するが、60 分ほどで飽和する傾向がある。

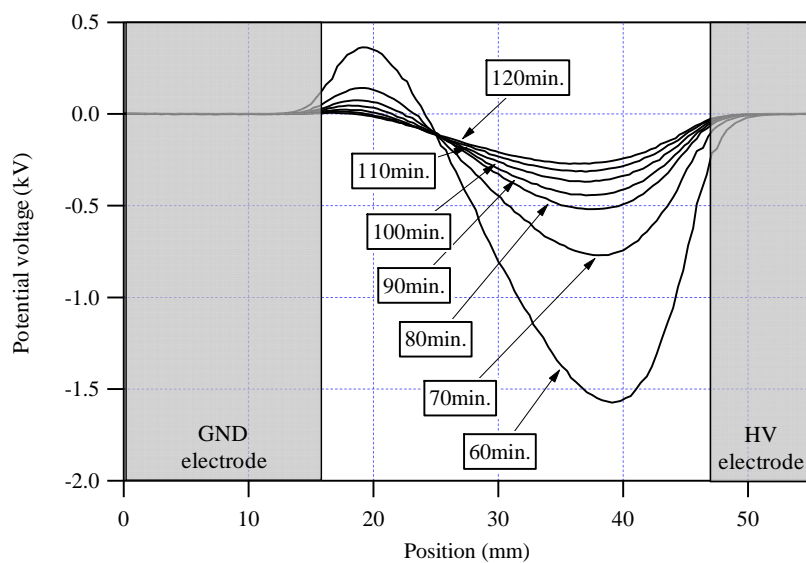


図 46 試料 D(平滑)における-10kV を 60 分印加後の 10 分毎電位分布測定結果

-10kV の電圧を 60 分印加し、印加停止してから 10 分ごとの電位分布の変化を示す。電位のピーク値は 10 分でほぼ半減している。

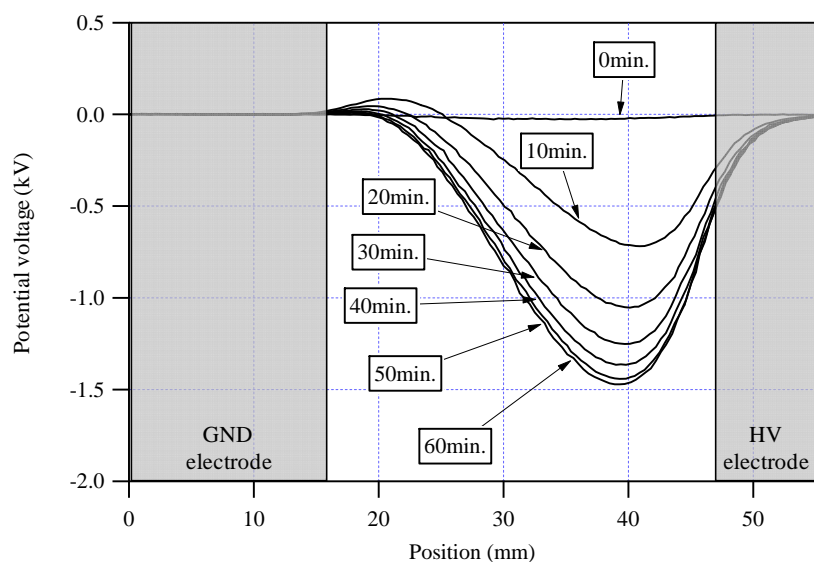


図 47 試料 G(粗面化)における-10kV 連続印加時の 10 分毎電位分布測定結果

-10kV を連続印加すると，高压電極(HV electrode)に近い部分では負帯電が発生しているが，接地電極(GND electrode)に近い部分での正帯電は粗面化なし試料 D より小さい。

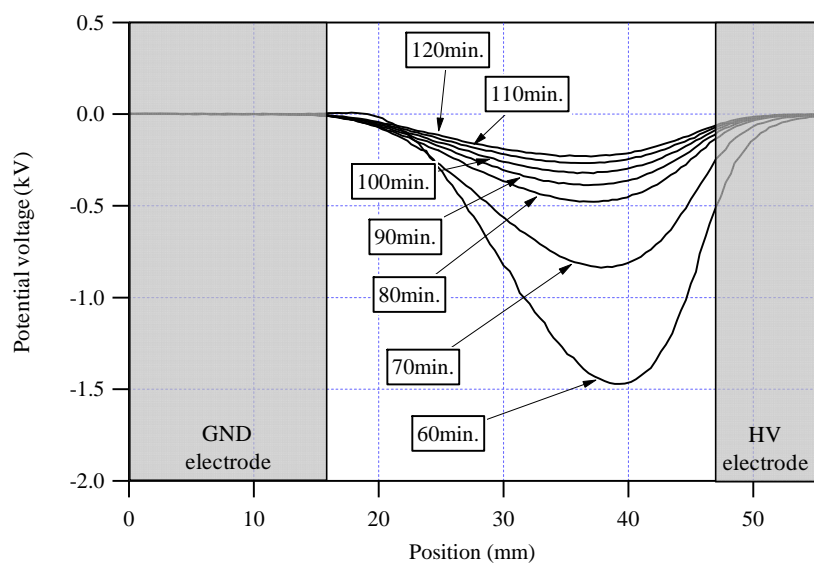


図 48 試料 G(粗面化)における-10kV を 60 分印加後の 10 分毎電位分布測定結果

-10kV の電圧を 60 分印加し，印加停止してから 10 分ごとの電位分布の変化を示す。試料 D と同様に，電位のピーク値は 10 分でほぼ半減している。

4.4 まとめ

本章のまとめを下記に述べる。帯電のメカニズム等の詳しい考察は第6章にまとめて述べる。

- (1) 電圧印加による微小放電が発生している状態での帯電を詳細に調べるため, サンドブラストにより表面凹凸の度合いを変えた試料を作製し, 表面電位分布を測定した。
- (2) 一定時間の電圧印加後に高圧電極を接地し, 電極間の電位差を除いた後に試料表面の帯電電位を測定した。さらに, 電圧印加を止めた後の電位分布も時間変化も測定した。
- (3) 平滑な試料では高圧電極付近では負帯電, 接地電極付近では正帯電していることが明らかになった。
- (4) 一方, 表面に凹凸のある試料では高圧電極付近では負帯電しているものの, 接地電極付近での正帯電はわずかである。
- (5) 平滑な試料, 凹凸のある試料の双方とも負帯電のピークの電位は電圧印加終了から 10 分後ではほぼ半減, 印加終了から 60 分後では 1/6 にまで減衰しており, 双方に傾向の大きな違いはない。
- (6) この帯電の減衰は電気伝導による電荷の中和であると考えられる。したがって, 帯電の減衰がほぼ同等の傾向であるため, 双方の電気抵抗は同等であると考えられる。

5. 放電による帯電の電位分布測定

先行研究[16][17][18][19]では試料の粗面化により耐電圧が向上していることが報告されている。そこで、帯電が放電に与える影響について定量的評価することを目的に、粗面化したガラス試料に帯電を与え、帯電分布の測定と放電電圧の測定を行った。この章では、測定の結果およびその考察について述べる。

5.1 目的

第3章では、真空中において絶縁体両端に電圧を印加した場合において、絶縁体上での帯電の発生を確認できた。さらに、粗面化した試料では帯電による電位上昇を抑制できることがわかった。

第4章では、表面の凹凸に関わらず帯電は全体的に負帯電であるものの、接地電極近傍では平滑試料では正帯電となるのに対し、凹凸試料では正帯電が起こらないことがわかった。

一方、山本らの研究[16][17][18][19]によれば、絶縁物表面を粗面化すると真空中での耐電圧性能が向上するとしている。耐電圧とは電極間を短絡する放電が発生する電圧を指す。このような放電は1.2.5 および図49に示す二次電子放出による帯電、すなわち二次電子なだれによる帯電が進行し、さらに電子と絶縁体との衝突により吸着ガスが放出されることによる真空度の悪化により発生する。この過程での最終的な放電の形態はフラッシュオーバーと呼ばれる。

これまでに得られた結果から粗面化した試料では帯電の抑制を観測できていることから、帯電と耐電圧性能には相関があると考えられる。絶縁体の表面の凹凸による帯電特性と放電特性の相関関係を把握できれば、沿面放電のメカニズム解明や、真空絶縁の高性能化に有効な知見を得られると考えられる。これを実現するにはあらかじめ試料を帯電させ、その状態での放電電圧を測定すればよい。しかしながら、開発した真空中表面電位計測装置では絶縁体に定量的に制御した帯電を与えながら、放電を評価することが難しい。

そこで、帯電を与える手段として、あらかじめ放電を起こし、試料に二次電子なだれによる帯電、あるいは電離した吸着ガス分子の残留による帯電を利用することとした。具体的な試験の手順としては、試料に電圧を印加し絶縁体の表面で放電させ、帯電を生成した後、帯電電位を測定し、さらに放電させる、という連続的な試験方法で帯電と放電の相関関係を評価することとする。

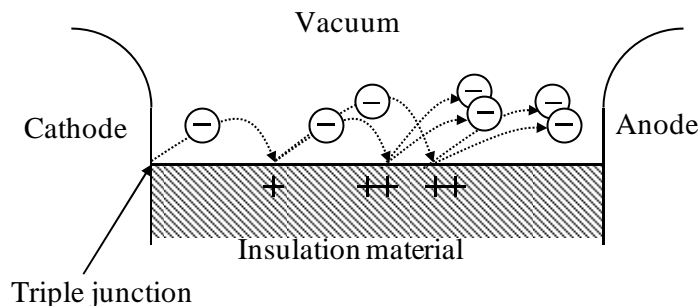


図49 絶縁体表面の帯電を伴った二次電子発生(図10の再掲)

5.2 測定方法

5.2.1 測定試料

測定試料は前章と同様である。前章では試料 D(粗面化なし)と試料 G(研磨材#280で粗面化, Ra 1.44 μ m)のみを測定したが, 本章では 4 種類の全てを測定する。図 50, 図 51, 表 4 および図 52 に試料の詳細を再掲する。

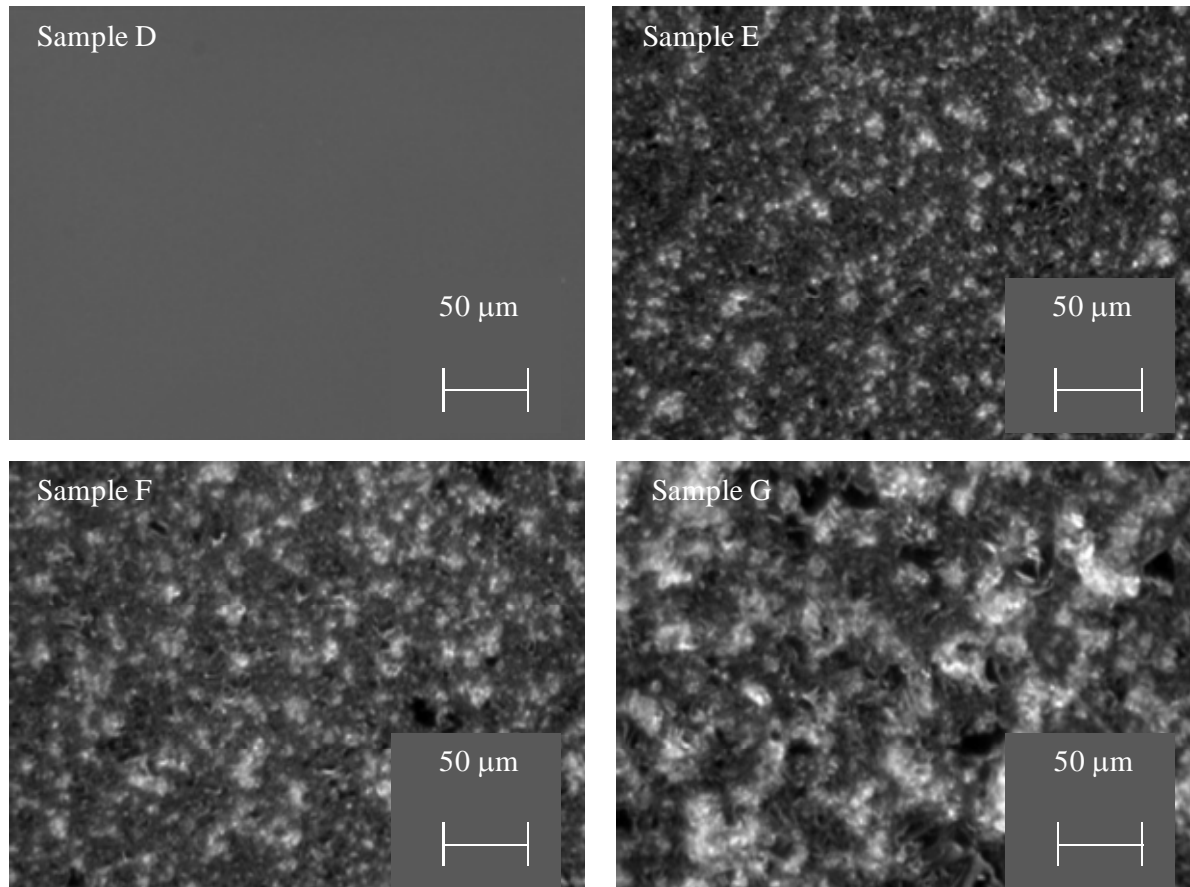


図 50 デジタルマイクロスコープによる撮影像(図 40 の再掲)

左上：試料 D, 成型時そのままの表面, 右上：試料 E, 研磨剤#2000 で粗面化
左下：試料 F, 研磨剤#800 で粗面化, 右下：試料 G, 研磨剤#280 で粗面化

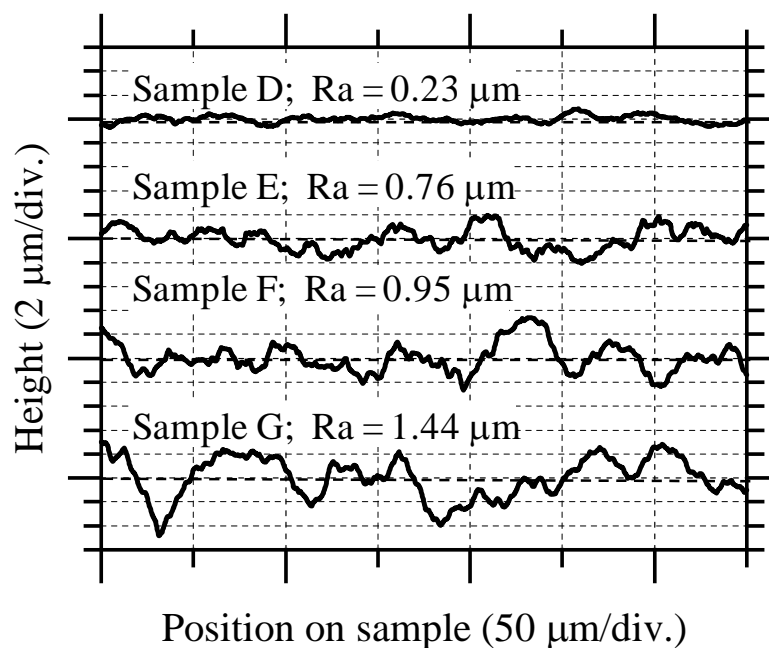


図 51 試料の表面凹凸観察結果と算術平均粗さ(図 41 の再掲)

3次元形状測定機能つきデジタルマイクロスコープにて測定。

表 4 試料の表面粗さ(表 3 の再掲)

試料 D～G について，研磨剤番号(Abrasive number)，研磨剤粒子径(Abrasive particle size)，算術平均粗さ(Arithmetic average roughness)をまとめる。

Sample name	Substrate	Abrasive number	Abrasive particle size (μm)	Arithmetic average roughness, Ra (μm)
Sample D	Borosilicate glass	Non-treated	Non-treated	0.23
Sample E	Borosilicate glass	#2000	6.7	0.76
Sample F	Borosilicate glass	#800	14.0	0.95
Sample G	Borosilicate glass	#280	48.0	1.44

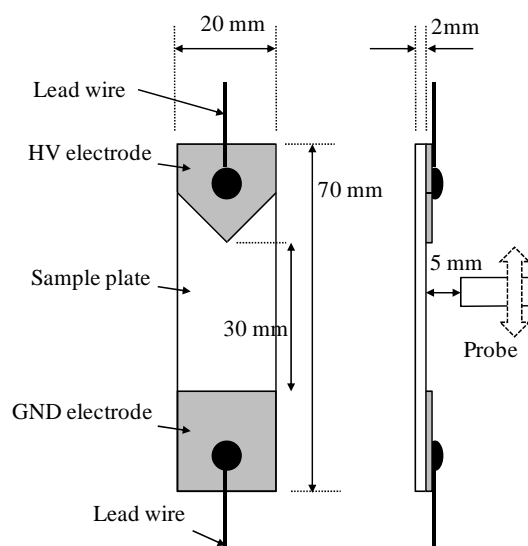


図 52 放電評価試験に用いた試料(図 42 の再掲)

平板ガラス (Sample plate) に銅箔の高圧電極(HV electrode), 接地電極(GND electrode)を接着し, 高圧電極のリード線(Lead wire)から電圧を印加する。

5.2.2 測定方法

絶縁体の表面で放電させ, 帯電を生成した後, 帯電電位を測定し, さらに放電させる, という一連の放電と帯電電位分布測定を下記の手順で実施する。

- (2) 図 19 のように板状の試料をホルダに取り付け, リード線を配線し, 試料に電圧印加できる回路を構成する
- (3) 真空層内の真空引きをする。ターボ分子ポンプで 1 日以上真空引きし, 圧力 $3 \sim 5 \times 10^{-4} \text{Pa}$ の範囲の真空度で試験を実施した。
- (4) 電圧を手動で概ね 1 kV/s で電流リミッタが動作するまで上昇させる。電流リミッタが動作したときの電圧を放電電圧とする。今回は電流リミッタを $18 \mu\text{A}$ にセットした。電流が $18 \mu\text{A}$ を超えた場合に電流が強制的に遮断される。
- (5) 放電後, 自動接地装置を作動させ, 高圧電極を接地し, 接地電位とする。接地により, 電極間の印加電圧による電位を消去し, 試料表面の帯電による電位分布を直接測定することができる。
- (6) プローブをスキャンし試料表面の電位を測定する。

上記(3)～(5)を繰り返し, 帯電と放電の関係を評価した。今回は電流リミッタを $18 \mu\text{A}$ に設定し, 電流が $18 \mu\text{A}$ を超えたときに放電と判断した。試験中に放電の様相を目視確認したが, 放電による発光は確認できず, この程度の電流での放電は非常に小規模であり, 電極間を短絡するような放電であるフラッシュオーバーには至っていないと判断できる。

このような小規模の放電でもマイクロフォーカスX線管, 電子顕微鏡, または電子線描画装置等においては, 測定や描画を中断するほどの放電電流である。

放電後に高圧電極を接地している。前章での測定結果では接地後に電位分布は約 10 分で半減するが, 今回の測定は接地後すぐに試料の中心線上から測定を開始しているため, 中心線上の電位分布は正確な値である。しかし, 2 次元の電位測定には

時間は約 140 秒要しており，最も試料中心線から離れたところでは帯電電位は 4/5 程度に減衰している可能性がある。

5.3 測定結果

前項で示した測定方法に従い，放電後の表面電位の測定を実施した。その結果について以下に述べる。

5.3.1 放電回数と放電電圧

(1) 放電電圧の放電回数依存性

図 53 に放電回数と初回から 50 回目までの放電電圧の相関を示す。表 5 に各試料の放電電圧特性を示す。放電電圧は放電回数とともに上昇する傾向があり，試料 D，E，F および G において，初回の放電電圧は 13，15，21 および 19kV であり，全 50 回の放電のうちの最大放電電圧は 18，36，32，44kV であった。

全 50 回の放電ではばらつきはあるものの，放電電圧は概ね試料 D が最も低く，試料 G が高い傾向がある。試料 E，F の放電電圧は試料 D と G の概ね中間ではあるが，ばらつきが大きいため試料 F，G の間で明確な差を見出せない。しかしながら，全体的には試料の表面粗さの指標である算術平均粗さ R_a が大きくなるに従い，放電電圧が高くなる傾向がある。

放電電圧が放電回数とともに上昇する傾向は真空中の放電現象に現れるコンディショニング効果であると考えられる。コンディショニング効果は放電回数が増加すると放電電圧の上昇比率が小さくなり，飽和する傾向がある。今回測定した全 50 回の放電ではまだ飽和の傾向が見られず，また試料 D 以外は放電回数に対する放電電圧のばらつきが大きいことがわかった。比較のため，図 53 には各試料の測定結果から最小二乗法を用いて得た近似直線も付記した。

表 5 には各試料の放電電圧特性を試料の表面粗さを併せてまとめた。試料 D～G の初回の放電電圧は 13，15，21 および 19kV であり，全 50 回の放電のうちの最大放電電圧はそれぞれ 18，36，32，44kV であった。近似直線の N の係数が正であることから，放電電圧は放電回数とともに上昇する傾向があることは明らかである。

試料 E と F に逆転する関係が見られるものの，全体的には試料の表面粗さが大きくなるに従い放電電圧が高く，少ない放電回数で放電電圧が上昇する傾向があることがわかった。

(2) 放電電圧のばらつき

放電電圧のばらつきを評価するため，放電電圧と近似直線の差を横軸に，その発生頻度を縦軸に整理したグラフを図 54～図 57 に示す。これらのデータを基にした標準偏差と各試料放電電圧特性を表 6 に示す。放電電圧のばらつきは試料 D では小さいものの，試料 E，F，G では大きくなる。試料 D では標準偏差が 1.4kV であるのに対し，試料 E，F，G では 6.0，4.0，5.8kV に大きく増大している。

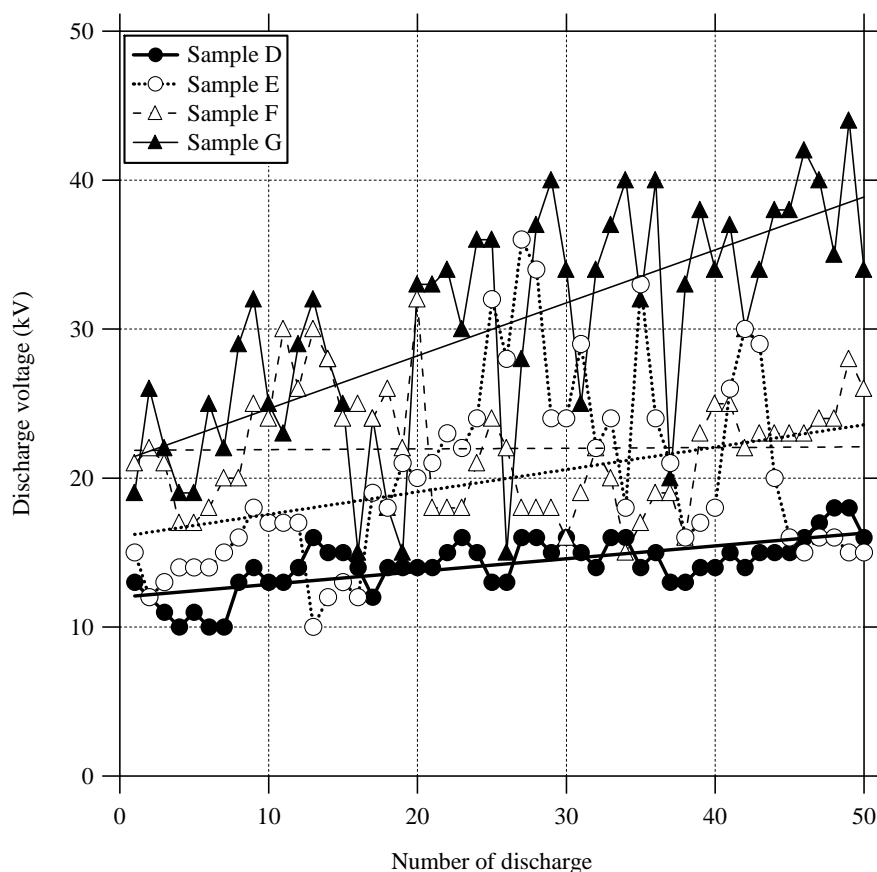


図 53 放電回数と放電電圧の相関

横軸は放電回数 (Number of discharge), 縦軸は放電時の電圧 (Discharge voltage)を示す。放電電圧は放電回数とともに上昇する傾向がある。全体的には試料の表面粗さが大きくなるに従い, 放電電圧が高い傾向がある。直線は最小二乗法による近似直線である。

表 5 各試料の放電電圧特性

近似曲線(Approximate line)の N の係数が正であることから放電電圧(Discharge voltage)は放電回数(Number of voltage)とともに上昇する傾向がある。全体的には試料の表面粗さ大きくなるに従い, 放電電圧が高い傾向がある。

Name	Sample		Discharge voltage (kV)		
	Abrasive number	Arithmetic average roughness, Ra(μm)	1 st	Maximum	Approximate line (V:discharge voltage, N: Number of discharge)
D	-	0.23	13	18	$V = 0.086 * N + 12.0$
E	#2000	0.76	15	36	$V = 0.15 * N + 16.1$
F	#800	0.95	21	32	$V = 0.0047 * N + 21.9$
G	#280	1.44	19	44	$V = 0.35 * N + 21.1$

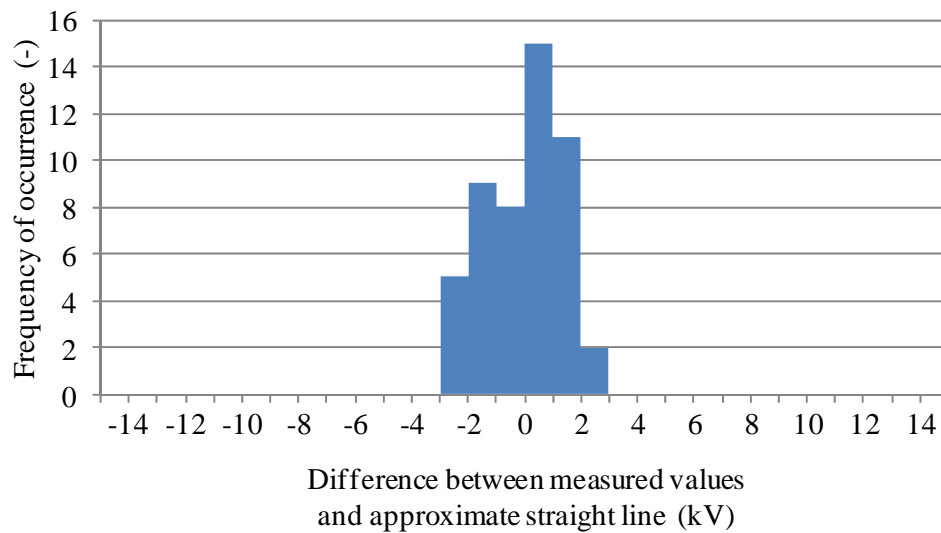


図 54 試料 D(粗面化なし, $R_a=0.23\mu\text{m}$)の放電電圧のばらつき
横軸は放電電圧と近似直線の差, 縦軸はその発生頻度を示す。標準偏差は 1.4kV である。

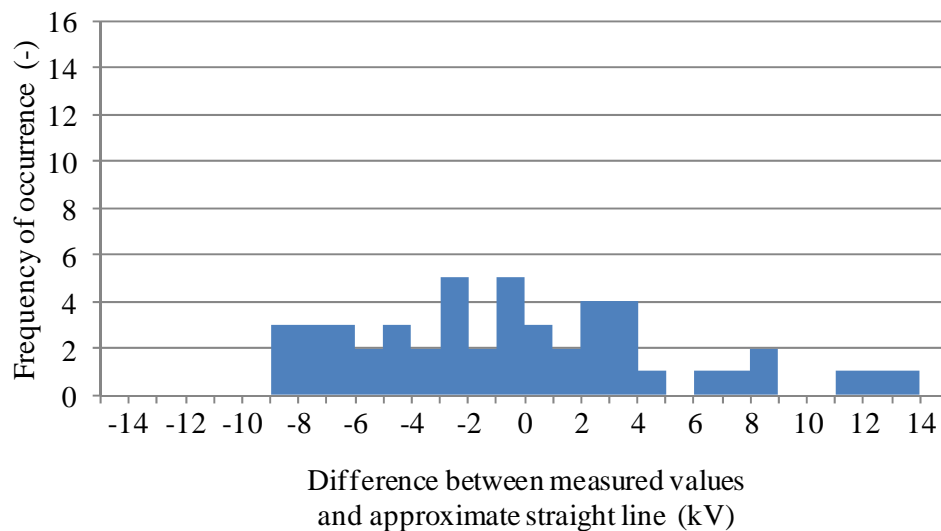


図 55 試料 E(#2000 で粗面化, $R_a=0.76\mu\text{m}$)の放電電圧のばらつき
横軸は放電電圧と近似直線の差, 縦軸はその発生頻度を示す。標準偏差は 6.0kV である。平滑な試料 D と比較するとばらつきが大きい。

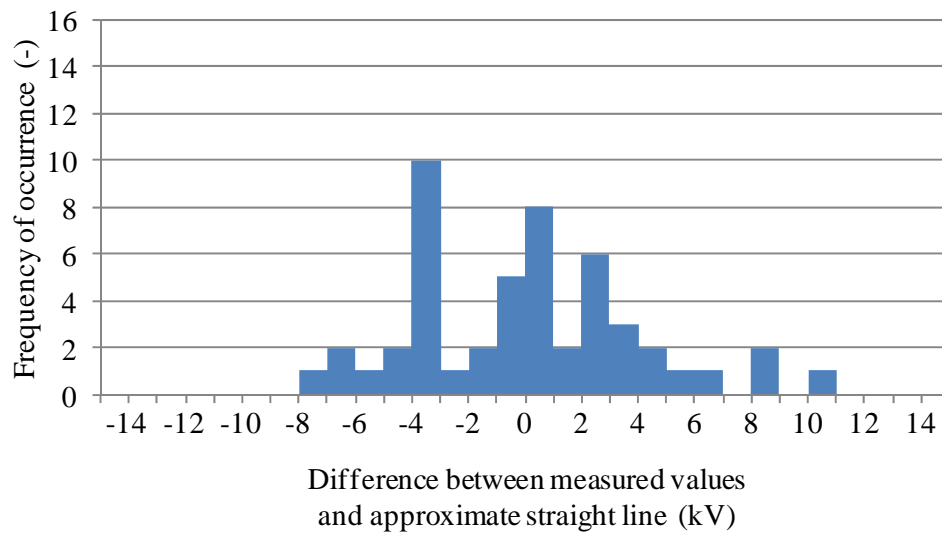


図 56 試料 F(#800 で粗面化, $R_a=0.95\mu\text{m}$)の放電電圧のばらつき
横軸は放電電圧と近似直線の差, 縦軸はその発生頻度を示す。標準偏差は 4.0kV である。平滑な試料 D と比較するとばらつきが大きい。

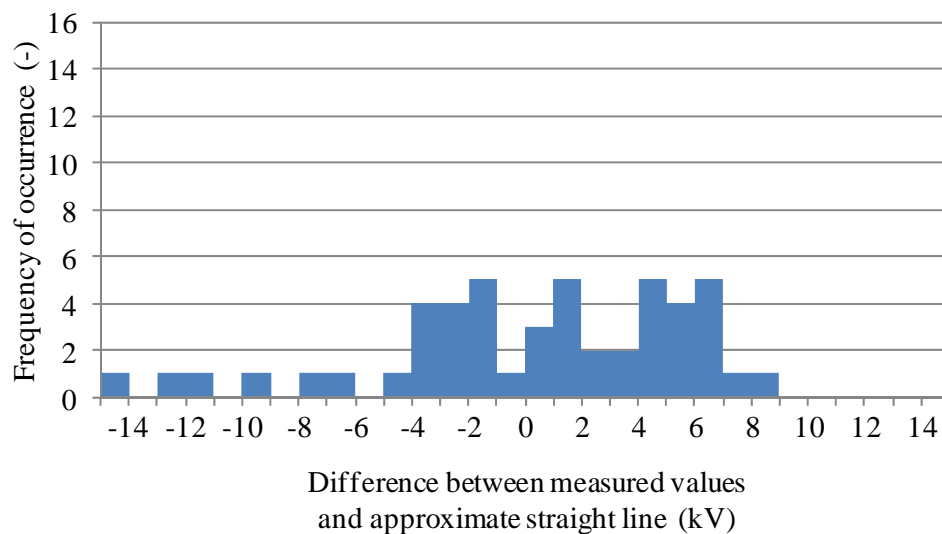


図 57 試料 G(#280 で粗面化, $R_a=1.44\mu\text{m}$)の放電電圧のばらつき
横軸は放電電圧と近似直線の差, 縦軸はその発生頻度を示す。標準偏差は 5.8kV である。平滑な試料 D と比較するとばらつきが大きい。

表 6 各試料の放電電圧特性

試料 D では標準偏差(Standard deviation)が 1.4kV であるのに対し、試料 E, F, G では 6.0, 4.0, 5.8kV に増大している。

Sample name	Discharge voltage (kV)		Standard deviation (kV)
	1 st	Maximum	
Sample D	13	18	1.4
Sample E	15	36	6.0
Sample F	21	32	4.0
Sample G	19	44	5.8

5.3.2 放電後の表面電位測定結果

(1) 二次元表面電位分布

図 58～図 61 に試料 D～G の二次元表面電位分布の測定結果を示す。ここでは試料の左半分のみ電位分布を示し、右側を省略している。前項で述べたように、全 50 回放電させたが、図 58～図 61 ではそのうちの 1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 25 回目の放電での電位分布を示す。試料の放電後において二次元表面電位分布を測定したところ、全ての試料で電位分布は正電位であることが判明した。高圧電極の頂点の延長線上に高電位部が顕著に存在する結果もあるものの、粗面化による試料の違いや放電回数による差異は二次元表面電位分布からは明白ではない。

(2) 試料中心軸上の電位分布

図 62～図 65 には試料 D～G に放電を繰り返した場合の試料中心軸上の電位分布の変化を示す。粗面化した試料 E, F, G では放電の回数に関係なく、電位分布が変化し、電位のピークは最小で 1kV 程度から最大で 5kV 程度まで変化する。一方、平滑な試料 D では概ね放電回数が増えるにしたがって電位が上昇している。電位のピークの位置 30mm の近辺から変化せず、ピークは 4kV 程度まで上昇する。

なお、図 62～図 65 では 0V であるはずの電極部分に電位が発生しているように見えるが、2.7 で述べたように測定電位は試料表面の±5mm 程度の平均値であり、これらは測定誤差である。

(3) 試料中心軸上の最大電位のばらつき

図 66 に各試料の放電後最大電位のばらつきとその平均値の比較を示す。図 66 にプロットした放電後の最大電位は 1～35 回, 40, 45, 50 回である。最大電位の平均値を比較すると D, F, G, H の順で低くなる。試料 E と F で順番は入れ替わるものの、表面凹凸が大きくなるに従い、帯電電位が下がる傾向が見られる。

(4) 帯電電位と放電電圧の関係

図 67 に 1 回前の放電による帯電電位分布の最大値と放電電圧の関係を示す。プロットしたデータにはばらつきが多いものの、試料 D は高い帯電電位で低い放電電圧である傾向、試料 G ではその逆で低い帯電電位で高い放電電圧である傾向が見られる。言い換えれば、試料表面の凹凸が小さいと帯電による電位が高くなり低い電圧でも放電しやすくなり、凹凸が大きいと帯電による電位が低くなり高い電圧で放電するようになる傾向がある。

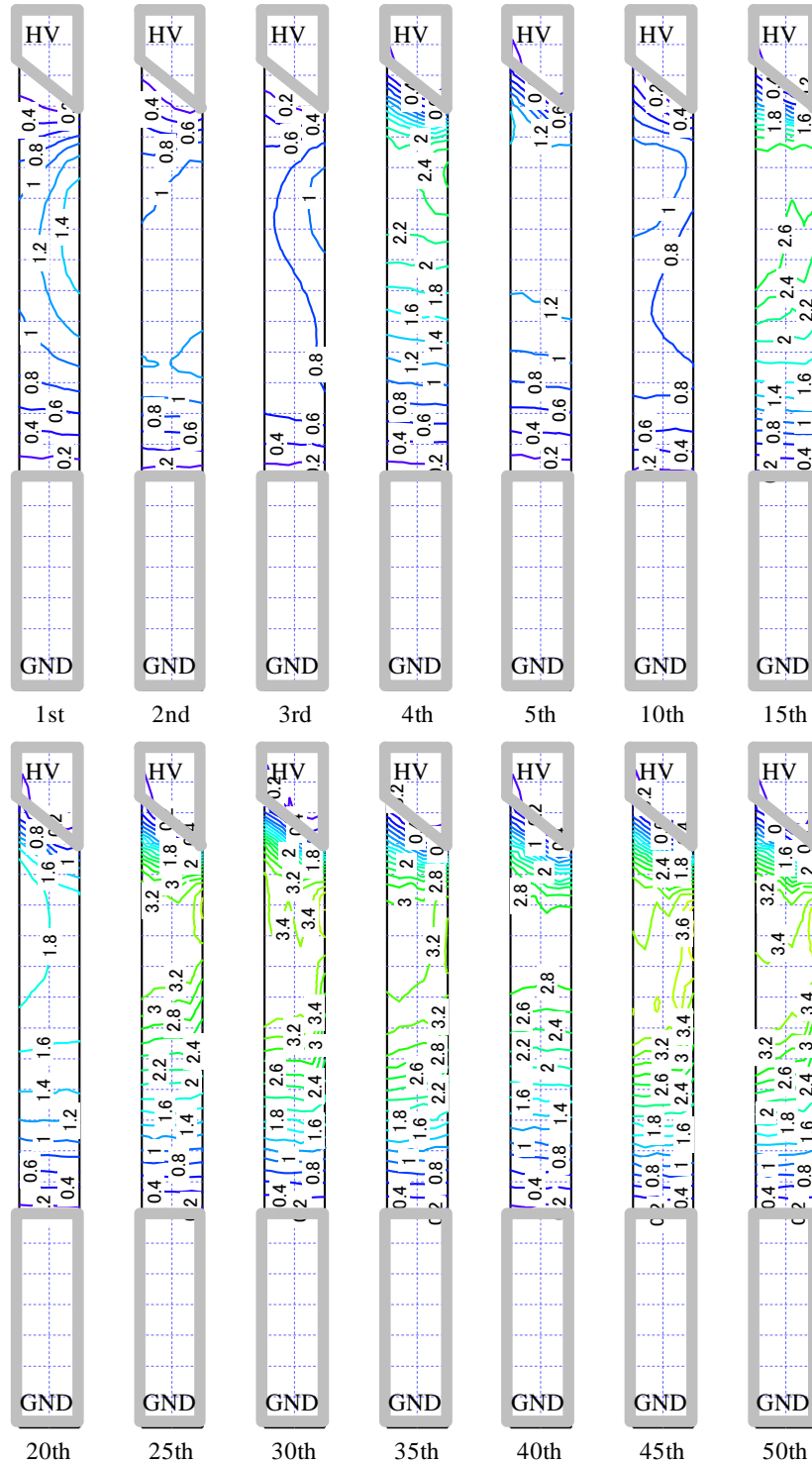


図 58 試料 D(粗面化なし, $Ra=0.23\mu m$)における放電後の二次元表面電位分布

電位の単位は kV, 位置の単位は $2.5mm/div.$ である。全体に正帯電している。高圧電極の頂点の延長線上に高電位部が顕著に存在する結果もあるものの(1, 3, 25, 45 回目), 放電回数による差異は二次元表面電位分布からは明白ではない。

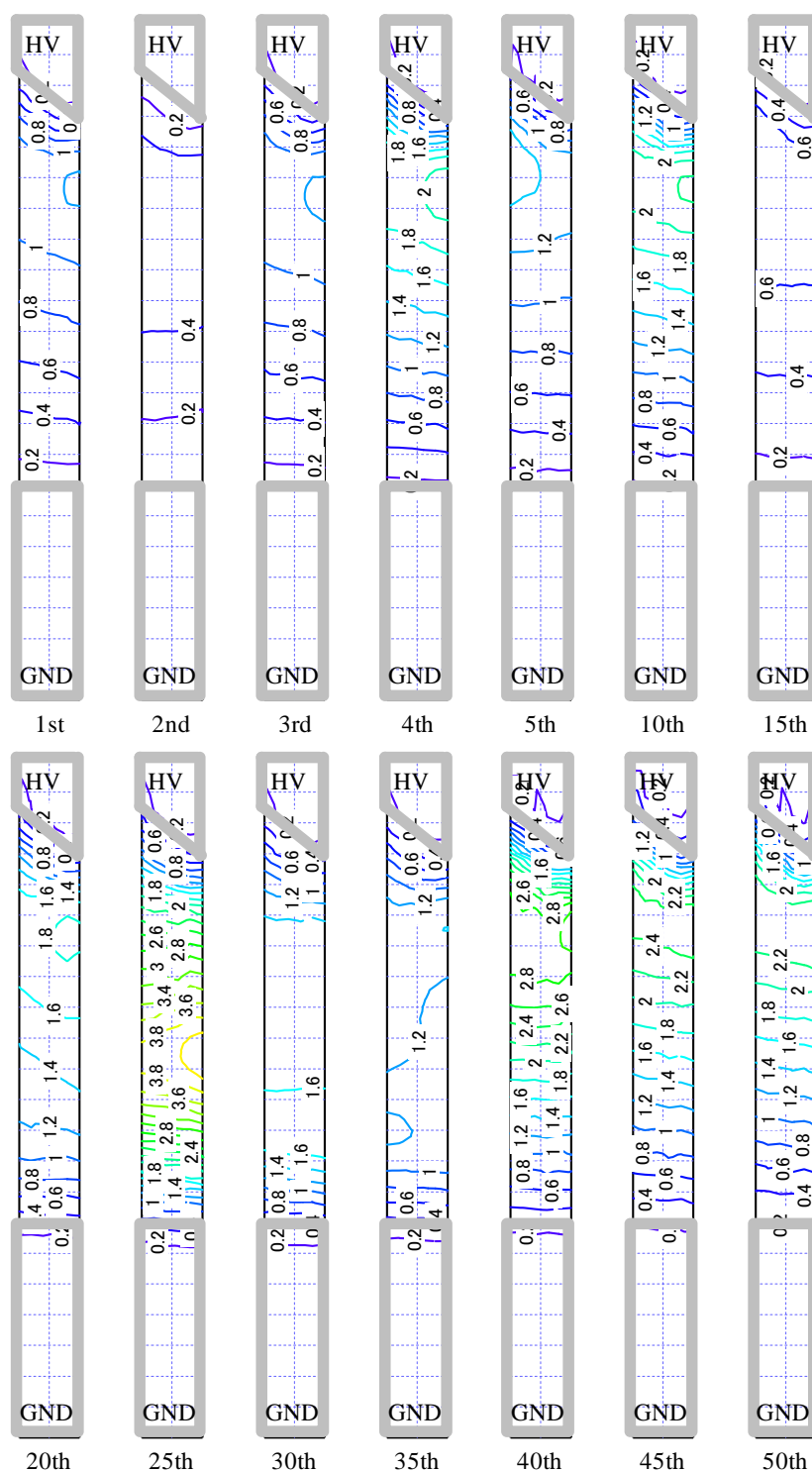


図 59 試料 E(#2000 で粗面化, $Ra=0.76\mu m$)における放電後の二次元表面電位分布

電位の単位は kV, 位置の単位は 2.5mm/div.である。全体に正帯電している。放電回数による差異は二次元表面電位分布からは明白ではない。

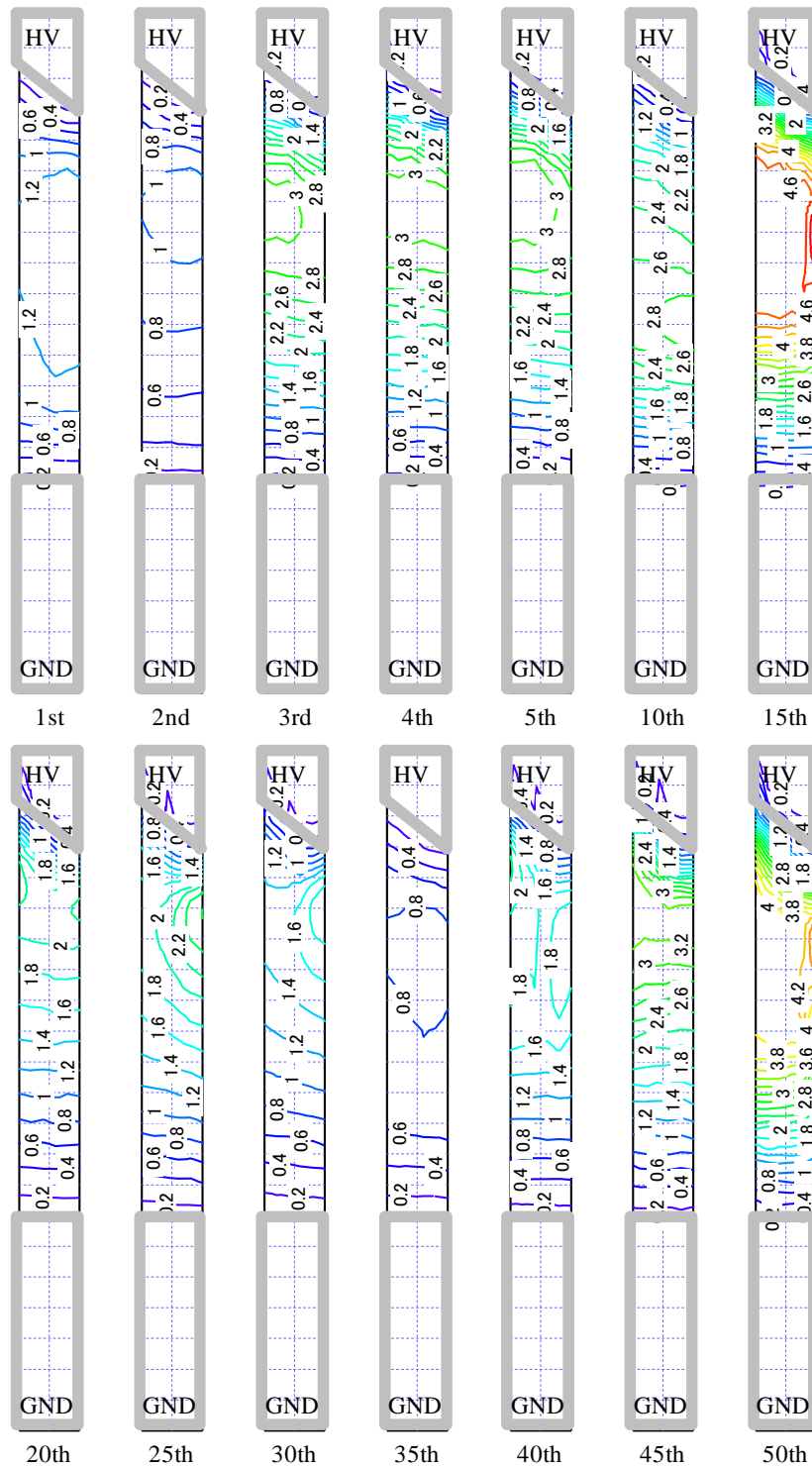


図 60 試料 F(#800 で粗面化, $Ra=0.95\mu m$)における放電後の二次元表面電位分布

電位の単位は kV, 位置の単位は 2.5mm/div.である。全体に正帯電している。高压電極の頂点の延長線上に高電位部が顕著に存在する結果もあるものの(15, 25, 50 回目), 放電回数による差異は二次元表面電位分布からは明白ではない。

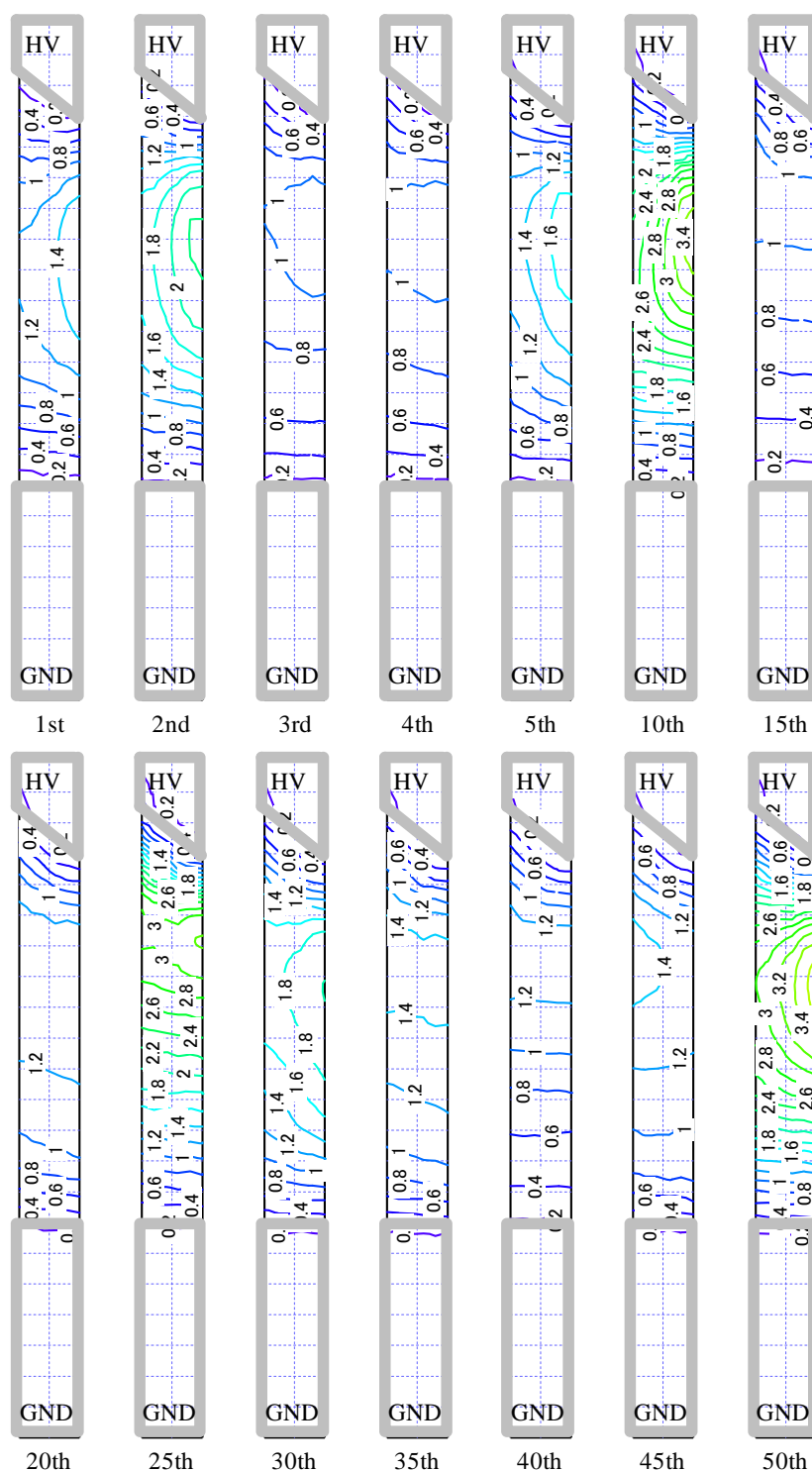


図 61 試料 G(#280 で粗面化, $Ra=1.44\mu m$)における放電後の二次元表面電位分布

電位の単位は kV, 位置の単位は $2.5mm/div.$ である。全体に正帯電している。高圧電極の頂点の延長線上に高電位部が顕著に存在する結果もあるものの(1, 2, 5, 50 回目), 放電回数による差異は二次元表面電位分布からは明白ではない。

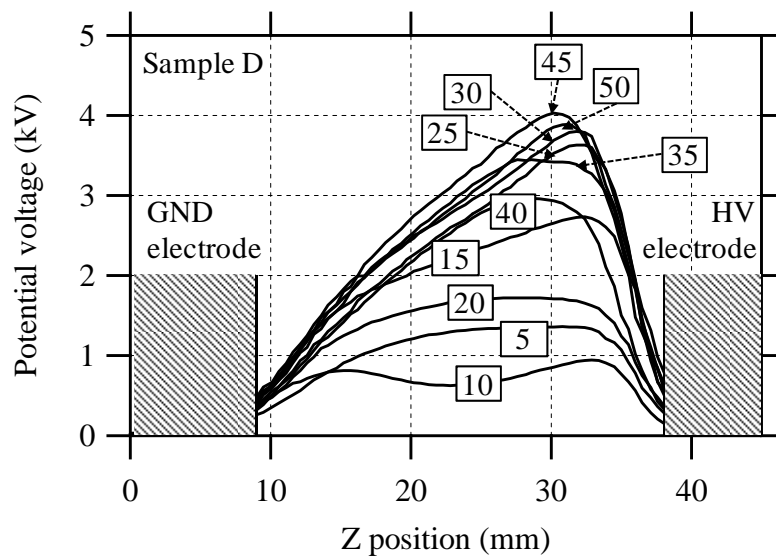


図 62 試料 D(粗面化なし, $R_a=0.23\mu\text{m}$)の放電後の試料中心線上表面電位分布

横軸に試料中心線上の位置(Z position), 縦軸に電位(Potential voltage)である。放電 5 回毎の電位分布を示す。図中の番号は積算放電回数を示す。全体に正帯電している。放電回数が増えるにしたがって概ね電位が上昇している。

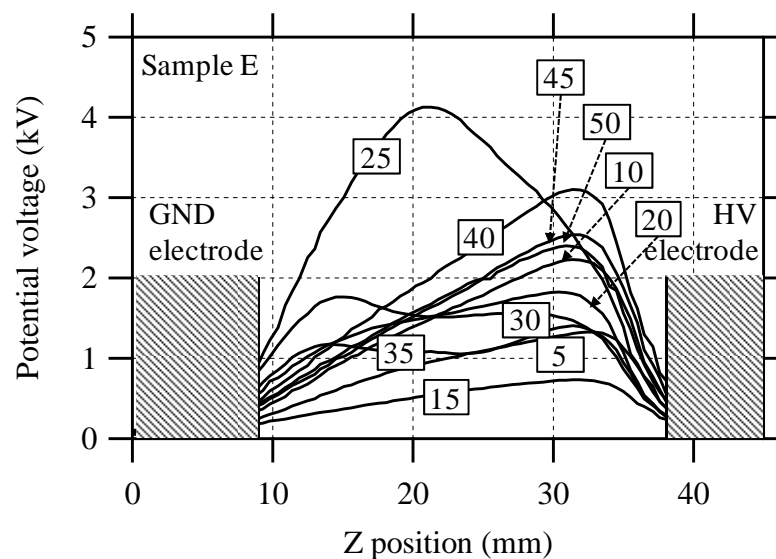


図 63 試料 E(#2000 粗面化, $R_a=0.76\mu\text{m}$)の放電後の試料中心線上表面電位分布

横軸に試料中心線上の位置(Z position), 縦軸に電位(Potential voltage)である。放電 5 回毎の電位分布を示す。図中の番号は積算放電回数を示す。全体に正帯電している。放電回数と電位の関連は明確ではない。

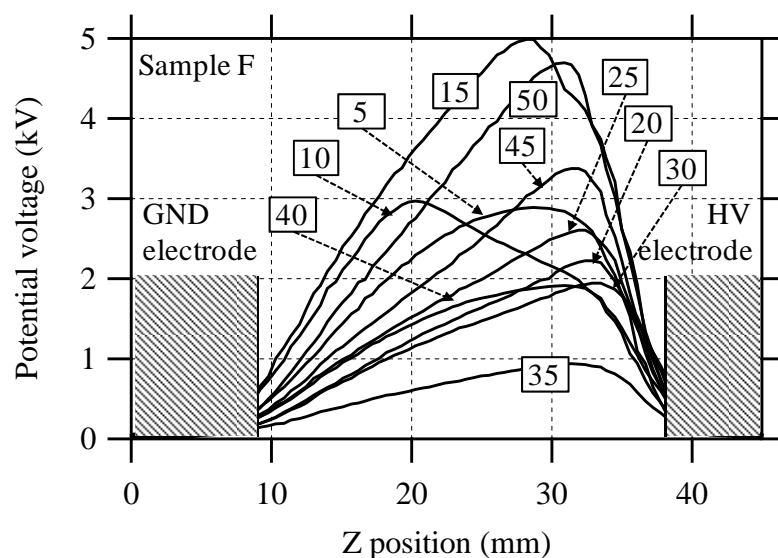


図 64 試料 F(#800 粗面化, $Ra=0.95\mu m$)の放電後の試料中心線上表面電位分布

横軸に試料中心線上の位置(Z position), 縦軸に電位(Potential voltage)である。放電 5 回毎の電位分布を示す。図中の番号は積算放電回数を示す。放電回数と電位の関連は明確ではない。

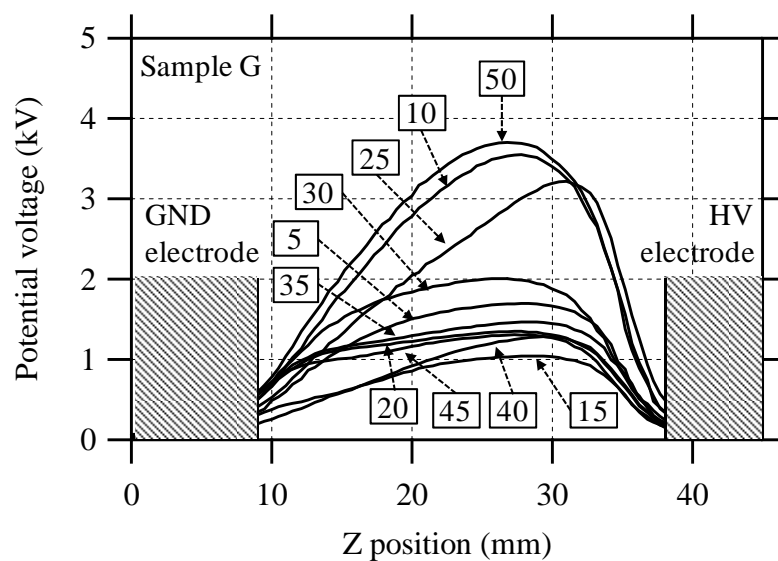


図 65 試料 G(#280 粗面化, $Ra=1.44\mu m$)の放電後の試料中心線上表面電位分布

横軸に試料中心線上の位置(Z position), 縦軸に電位(Potential voltage)である。放電 5 回毎の電位分布を示す。図中の番号は積算放電回数を示す。全体に正帯電している。放電回数と電位の関連は明確ではない。

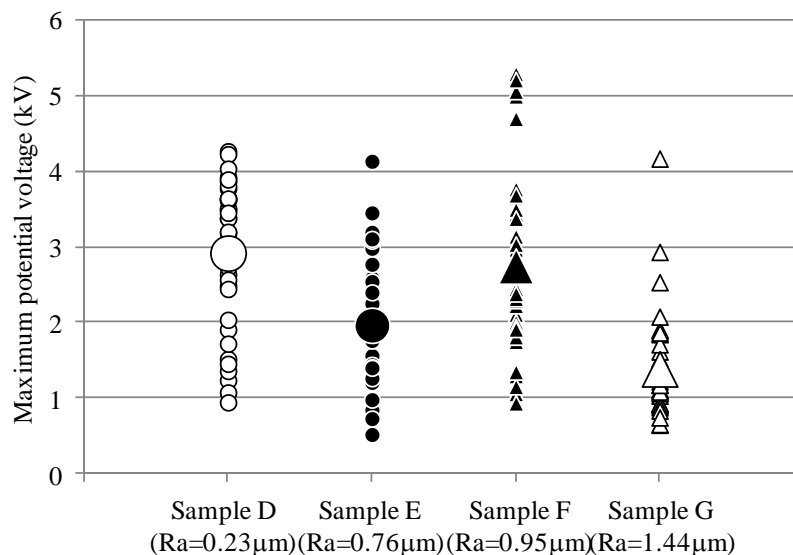


図 66 各試料の放電後最大電位のばらつきとその平均値の比較

大きなマークは平均値を示す。表面凹凸の大きさが大きくなるに従い、帯電電位が下がる傾向が見られる。

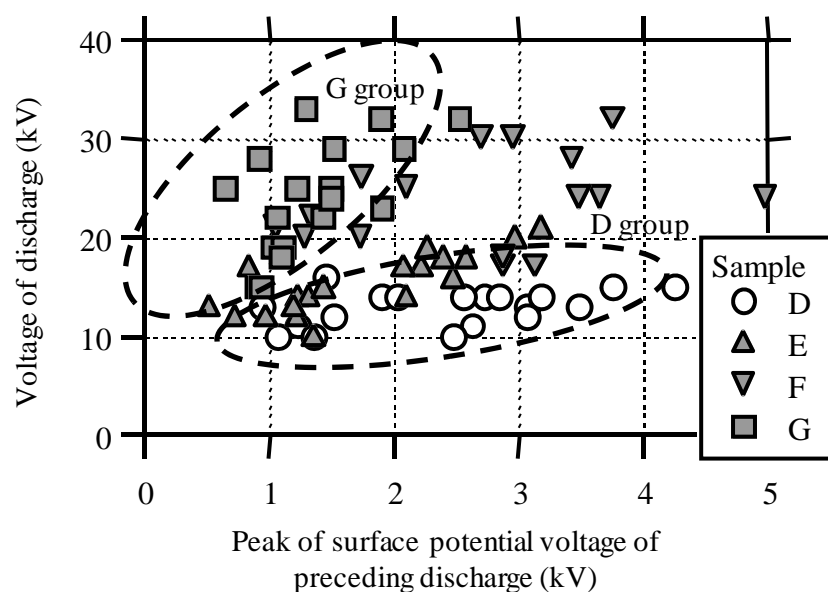


図 67 1 回前の放電による帯電電位と放電電圧の関係

横軸に 1 回前の放電による帯電電位の最大値(Peak of surface potential voltage of preceding discharge), 縦軸に帯電後の放電電圧 (Voltage of discharge)を示す。平滑な試料 D は高い帯電電位で低い放電電圧である傾向、粗面化した試料 G ではその逆で低い帯電電位で高い放電電圧である傾向がある。

5.4 まとめ

本章のまとめを下記に述べる。帯電のメカニズム等の詳しい考察は第6章にまとめて述べる。

- (1) 試料に電圧を印加し絶縁体の表面で放電させ、帯電を生成した後、帯電電位を測定し、さらに放電させる、という連続的な試験方法で帯電と放電の相関関係を評価した。
- (2) 平滑な試料と比較すると、表面凹凸がある試料では、放電電圧が高い、コンデューショニング効果大きい、放電電圧のばらつき大きい。
- (3) 帯電については表面凹凸に関わらず正帯電である。
- (4) 平滑な試料では放電回数とともに帯電電位が上昇する傾向があるのに対し、表面凹凸がある試料では放電回数と帯電電位は無関係である。
- (5) 帯電と放電の相関については、平滑な試料では帯電電位が高く、低い電圧でも放電しやすい傾向である。一方、凹凸のある試料では帯電電位が低く、高い電圧で放電する傾向がある。

6. 考 察

6.1 表面凹凸による帯電抑制の効果に関する考察

第3章で述べた測定結果より表面凹凸による帯電抑制の効果を検討する。図68に平滑な試料Aの電界分布、図69にサンドブラストで粗面化した試料Cの電界分布を再掲する。双方とも電圧印加中に測定した結果である。

試料の電極間は30mmであり、-10kV印加時のガラス表面には帯電の影響を無視すると0.33kV/mmの平均電界が発生しているはずである。測定結果によると、試料Aでは帯電を含む0.7kV/mmの電界が発生しており、帯電の影響と思われる電界は0.37kV/mm程度と推測でき、これは電極間の電界である0.33kV/mmと同等の値であるため、無視できない値であると考えられる。さらに試料B、Cではガラス表面に凹凸を設けるという比較的簡単な加工により電極間の電界分布を平準化することができ、同様の推測では帯電による電界は0.07kV/mm程度であると考えられる。

以上の知見より、絶縁体表面を粗面化し、凹凸を設けるという簡単な方法により、各種真空絶縁応用機器の高電圧化や絶縁高信頼化が可能である。高電圧機器への適用を前提とすると、機能やコストの面から絶縁体材料や形状の制約があることが多い。したがって、本研究のような絶縁体表面を粗面化し、小さな凹凸を設けるという手法による絶縁性能の向上はそのような制約がなく、今後期待が持てると考えられる。

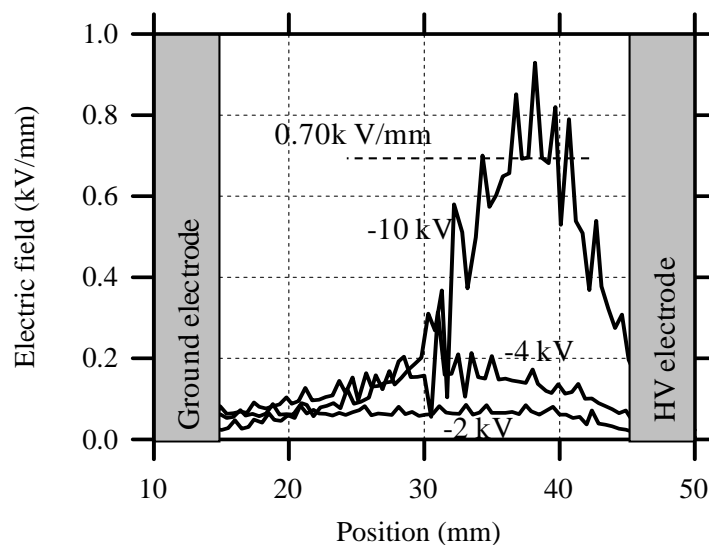


図 68 電圧印加中の試料 A(平滑ガラス)の表面電界分布(図 35 の再掲)

横軸に試料中心軸上の位置(Position)、縦軸に電界(Electric field)を示す。-10kV 印加時の最大電界は 0.70 kV/mm である。

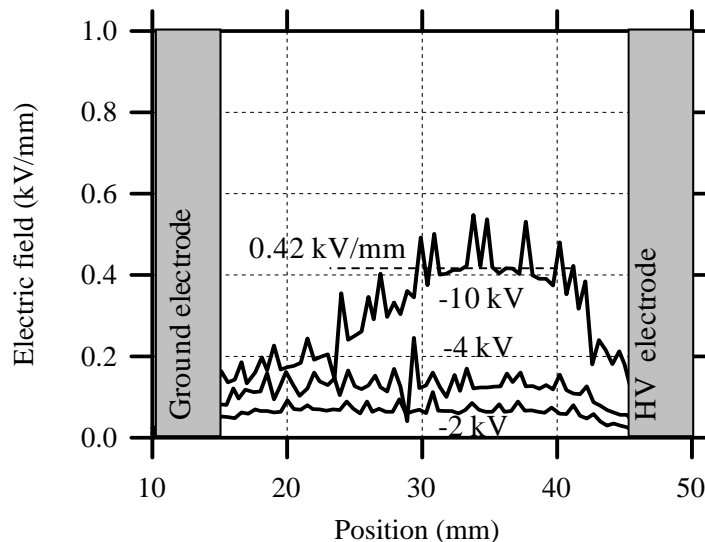


図 69 電圧印加中の試料 C(サンドブラスト粗面化)の表面電界分布(図 39 の再掲)

横軸に試料中心軸上の位置(Position), 縦軸に電界(Electric field)を示す。-10kV 印加時の最大電界は 0.42 kV/mm であり, 試料 A より小さい。

6.2 抵抗率に関する考察

第 4 章では, 試料に一定時間の電圧印加後に高压電極を接地し, 電極間の電位差を除いた後に試料表面の電位を測定した結果を述べた。さらに, 電圧印加を止めた後の電位分布も時間変化も測定した。その測定結果を図 70, 図 71 に再掲する。

平滑な試料, 凹凸のある試料の双方とも負帯電のピークの電位は電圧印加終了から 10 分後ではほぼ半減, 印加終了から 60 分後では 1/6 にまで減衰しており, 双方に傾向の大きな違いはない。

双方の試料とも真空中に置かれており, この帯電の減衰は伝導電子による電荷の中和であると考えられる。帯電の減衰がほぼ同等の傾向であるため, 双方の電気抵抗は同等である。したがって, 表面凹凸の有無による帯電分布の違いは抵抗値の違いによるものではなく, 電極から発生した電子が試料表面に衝突することにより帯電が発生する過程そのものに表面凹凸が影響しているとするのが妥当である。

一般的には, 絶縁体の抵抗率を下げることににより, 帯電を抑制できる。例えば, 静電気防止用としてさまざまな材料が適用されている。例えば, 導電性ゴムを用いた有機溶剤の爆発防止のための静電マット等である。静電気防止用途では抵抗率は低いほうが望ましいと言える。

低抵抗の絶縁体を用いることで帯電の影響を抑制した先行研究[29]がある。超小型の電子顕微鏡を実現するために, 低抵抗体の絶縁体を採用し, 絶縁体の帯電による電子ビームの偏向を防止するという技術である。低抵抗であれば伝導電子により帯電の中和が速やかにできるはずであり, 非常にスマートな方法である。

しかしながら, 低抵抗絶縁体はアルミナに導電性の材料を混ぜる等の手法で製造するものであり, コストが高く, 抵抗値が安定しない等の課題もある。また, 低抵抗絶縁体では僅かながら電流が流れるため, 高電圧を絶縁する場合はジュール発熱が無視できないことや, 大電流が流れてしまうような場合は電源容量の見直しする

必要があること等の課題もある。

本研究では課題の多い低抵抗絶縁体を採用することなく、表面粗面化による絶縁体表面の凹凸形成という簡単なプロセスで帯電を抑制できることを明らかにできた。

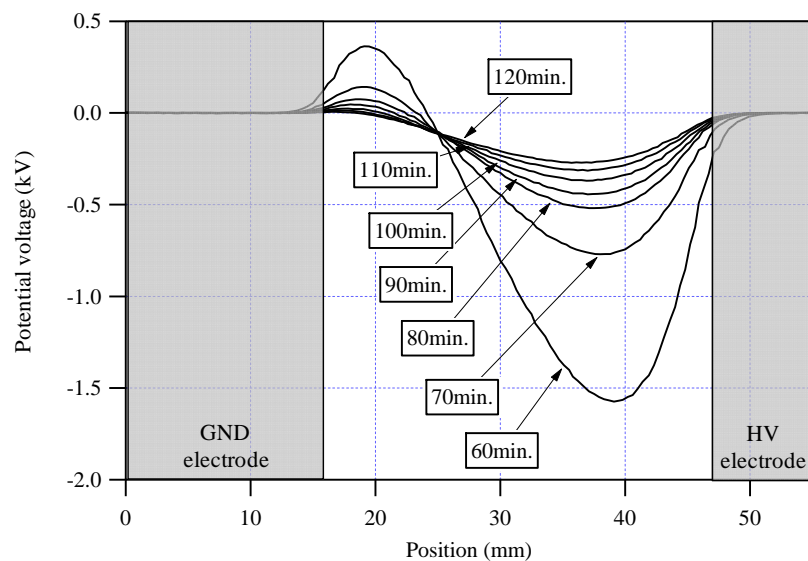


図 70 試料 D(平滑)における-10kV を 60 分印加後の 10 分毎電位分布測定結果
(図 46 の再掲)

-10kV の電圧を 60 分印加し、印加停止してから 10 分ごとの電位分布の変化を示す。電位のピーク値は 10 分でほぼ半減している。

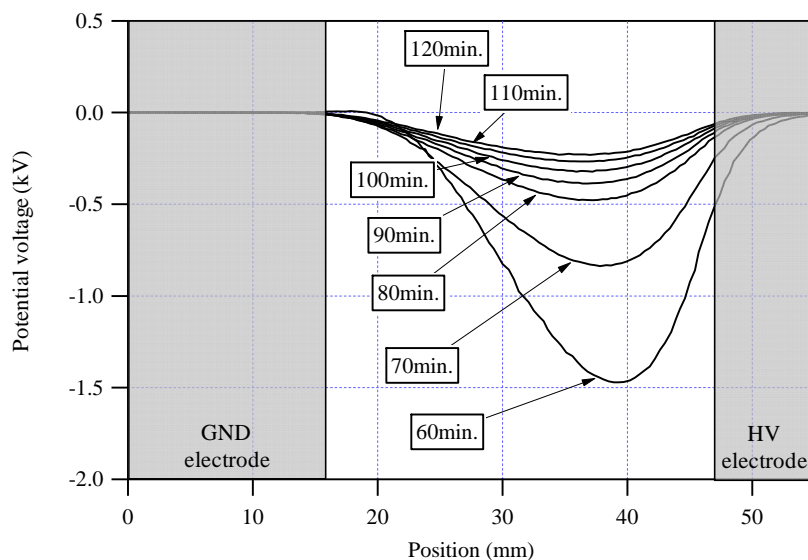


図 71 試料 G(粗面化)における-10kV を 60 分印加後の 10 分毎電位分布測定結果
(図 48 の再掲)

-10kV の電圧を 60 分印加し、印加停止してから 10 分ごとの電位分布の変化を示す。試料 D と同様に、電位のピーク値は 10 分でほぼ半減している。

6.3 帯電メカニズムに関する考察

6.3.1 微小放電による帯電メカニズム

第4章では電極で微小放電を発生させ、電源を OFF した後、絶縁体の帯電分布を測定した。帯電の分布については、全体に負帯電しており、表面が平滑である試料では高压電極側に正帯電する箇所が認められるものの、表面に凹凸を有する試料では正帯電はほとんどない。

これらの帯電は図 72 に示したモデルで説明できる。電極から出た電子は当初はエネルギーが小さく、絶縁体に衝突したとしても二次電子放出係数が 1 以下であり、高压電極に近いところでは絶縁体は負帯電を示す。平滑な表面であれば電子は散乱されにくく、加速されエネルギーが大きくなり、接地電極側に近いところで絶縁体に衝突すると二次電子を放出し絶縁体は正帯電となる。したがって、電位分布は全体的に負帯電ではあるものの、接地電極に近い領域では正帯電の傾向を示す。

一方、凹凸を有する表面では電子は絶縁体表面で散乱され、加速されずエネルギーが小さいままであり、二次電子の発生も少なく負帯電のままとなる。この場合の電位分布は凹凸を有する絶縁体では接地電極近傍の正帯電が小さくなる。

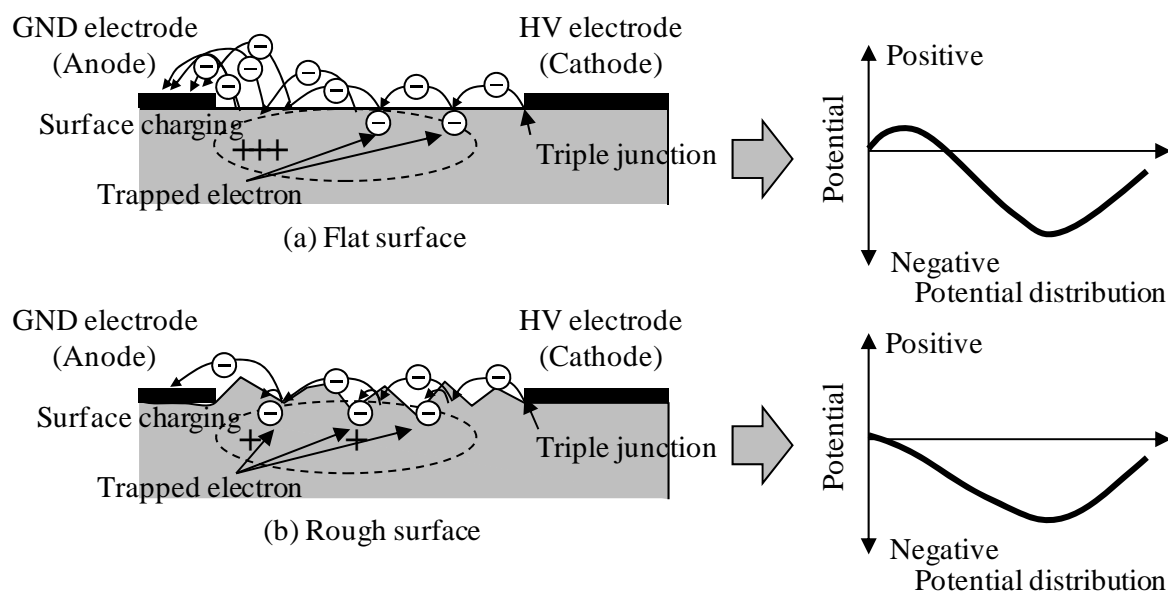


図 72 絶縁体表面上の推定帯電メカニズム

高压電極に近い領域では加速が十分ではなく、二次電子放出係数が小さく平滑試料、凹凸試料双方で負帯電を示す。接地電極近傍では平滑試料では電子は加速され二次電子が増えることにより正帯電となるのに対し、凹凸試料では凹凸による散乱を受け加速されず二次電子が増えず正帯電が起こらない。

6.3.1 大きな放電による帯電メカニズム

第5章では電源リミッタが作動する $18\mu\text{A}$ での放電を発生させ、その後、絶縁体の帯電分布を測定した。測定結果では、全ての放電電圧は -10kV を超えており、帯電は正帯電であった。

ホウケイ酸ガラスの二次電子放出係数のデータの代替として、表7に再掲する SiO_2 の二次電子放出係数と比較すると、絶縁体に衝突する電子の大半は少なくとも 0.5keV 以上に加速されており、1個の電子衝突に対し1個以上の二次電子を放出するため絶縁体が正帯電すると考えるのが妥当であろう。

平滑な試料 D では試料中心軸上の電位が放電回数とともに上昇する傾向があった。これに対し、粗面化した試料 E, F, G では放電ごとに電位分布が異なる傾向があった。これは絶縁体表面での凹凸により電子が散乱されやすいことが原因と考えられる。さらに、平滑な試料と比べて、凹凸を有する試料の帯電電位の平均値は低く、帯電が抑制されている結果が得られていることから、帯電の抑制は表面の凹凸による電子の散乱の影響と考えられる。これらより、 -10kV 以上での比較的大きな放電による帯電メカニズムを図73に示す。

平滑な試料と凹凸のある試料の双方において、放電の際に電極から放出された電子は絶縁体に衝突して二次電子を放出し、絶縁体が正帯電する。さらにこれらの電子は陽極に向かって加速され、二次電子も増加する。

平滑な試料では凹凸による散乱を受けにくいため、電子は比較的直線的に進むため、放電の回数が増えるに従い、試料中心線上の帯電電位は上昇する。一方、凹凸を有する試料では電子が凹凸による散乱を受けるため、放電ごとに電位が変動すると考えられる。

この様子を図74に3次的に表す。平滑な試料では二次電子なだれが発生し電子は絶縁体と衝突しながらも比較的直線的に進むのに対し(左)、粗面化し凹凸のある試料では電子が表面で大きく散乱され、減速される。したがって、電子は放電ごとに異なる方向に散乱され、減速された電子には二次電子放出係数が1以下になり絶縁体に付着するものもある。

このため、凹凸のある試料では帯電電位に変動が大きくなる。このようなメカニズムであれば、定性的には帯電の現象は説明ができる。現在のところ仮説あるので、さらに詳細な研究が必要である。

表7 二次電子放出係数の典型例 (表1の再掲)

Material	δ_{max} (-)	E_{max} (keV)
SiO_2	~4	~0.5
Al_2O_3	~8	~2.0
MgO	~8	~1.0

6.4 帯電と放電電圧の関係に関する考察

図 67 に示した 1 回前の放電によって生じた帯電電位分布の最大値と放電電圧の関係を再掲する。ばらつきが多いものの、試料表面の凹凸が小さいと帯電による電位が高く低い電圧でも放電しやすくなり、凹凸が大きいと帯電による電位が低く高い電圧で放電する傾向であるという結果が得られた。

図 66 に示すように、平滑な試料 D と凹凸の大きい試料 G を比較すると、帯電電位の最大値は試料 G が低いことが明らかである。この試験のように繰り返しの放電が発生し、帯電が発生する場合には凹凸のある絶縁体は放電電圧が高くなることが明らかになった。

本研究では絶縁体表面の凹凸が帯電を抑制し、さらに放電電圧を向上する効果があることを見出した。凹凸のある絶縁体の帯電メカニズムも明らかにした。今後は真空絶縁応用機器への広い応用が期待できる。

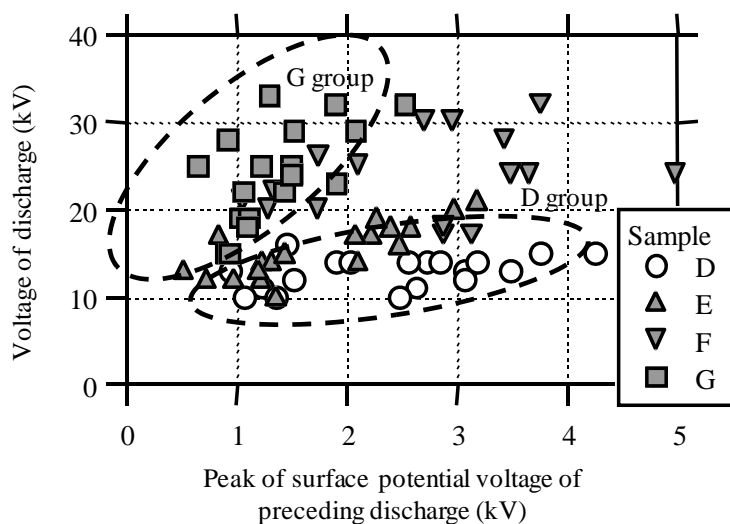


図 75 1 回前の放電による帯電電位と放電電圧の関係(図 67 の再掲)

横軸に 1 回前の放電による帯電電位の最大値(Peak of surface potential voltage of preceding discharge), 縦軸に帯電後の放電電圧(Voltage of discharge)を示す。平滑な試料 D は高い帯電電位で低い放電電圧である傾向、粗面化した試料 G ではその逆で低い帯電電位で高い放電電圧である傾向がある。

7. 結 言

7.1 結論

本研究では、X 線管、電子顕微鏡、電子・荷電粒子ビーム応用機器等に代表される真空絶縁機器に課題となる絶縁体の帯電と沿面放電電圧の関係を明らかにするため、真空中表面電位計測装置を開発し、帯電と沿面放電に関する評価と検討を行った。その結果、以下の結論を得た。

- (1) 測定電圧±20kV 非接触表面電位計による真空中での絶縁体の帯電電位計測、実験状況を観測できるガラス製真空容器、±200kV の直流高電圧電源による試料への電圧印加を特徴とする真空中表面電計測装置を開発した。
- (2) 表面が平滑なホウケイ酸ガラスと、凹凸を形成したホウケイ酸がガラスに真空中で連続的に電圧を印加し、電圧印加中に試料表面の電位を測定したところ、凹凸ありの試料では電位分布が接地電極側で正電位に屈曲する。
- (3) 印加電圧の影響を除くため、電圧を OFF することにより、帯電による電位のみを測定した。試料表面は全体に負帯電が発生し、表面が平滑である試料では接地電極側に正帯電する箇所があるのに対し、表面に凹凸を有する試料では正帯電はほとんどない。
- (4) 放電電圧は、平滑な試料に比べて凹凸を有する試料は倍近い耐電圧を有する。
- (5) 放電後の平滑な試料、凹凸がある試料双方とも、放電後の帯電は正帯電であった。
- (6) 平滑な試料では帯電電位が放電回数とともに上昇する傾向がある。これに対し、粗面化した試料では放電ごとに電位分布が異なる傾向がある。これらは絶縁体表面での凹凸により電子が散乱されるというモデルで説明ができる。
- (7) 試料表面が平滑であると帯電による電位が高くなり低い電圧でも放電しやすくなり、凹凸が大きいと帯電による電位が低くなり高い電圧で放電する傾向がある。帯電は放電に影響を与えることが明らかになった。
- (8) 電圧印加後の電位分布の時間変化は凹凸の有無に依らず同等であるため、試料の抵抗値は同等である。したがって、上記の測定結果での表面凹凸の有無による帯電分布の違いは抵抗値の違いによるものではない。
- (9) 以上の知見より、絶縁体表面を粗面化し、凹凸を設けることにより、各種真空絶縁応用機器の高電圧化や絶縁高信頼化が可能となる。本研究のように、絶縁体表面を粗面化し、小さな凹凸を設けるという手法は非常に簡単であり、今後期待が持てる手法である。

7.2 今後の展望

- (1) 本研究では真空中の絶縁体の帯電・放電を実験により評価し、帯電や放電の傾向を明確にできた。本研究では試料をガラスで比較したが、実際に真空中で用いられる絶縁材料としては他に、高真空対応絶縁材としてアルミナに代表されるセラミックス、宇宙機等で用いられるポリイミド樹脂等が挙げられる。これらについても表面凹凸の影響があるか、興味があるところである。試験に用いたホウケイ酸ガラスの体積抵抗率は $10^{15} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上であるのに対し、アルミナは公称 $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ 以上、あるいはより体積抵抗率の低いもの

も市販されており、体積抵抗率による帯電抑制の効果と、凹凸による効果の比較についてもさらに研究の余地がある。

- (2) 凹凸の大きさについては、本研究では数 μm で試験を行った。耐電圧についても数 μm 程度の凹凸により向上が見られるという報告[18]もあり、帯電や放電に対しての効果としては数 μm の凹凸で顕著になると考えられる。さらに凹凸を大きくした場合は現状では定かではないが、耐電圧では大きな向上が見られない[18]。帯電に関しては現状のところ不明である。この限界については何らかの物理的なメカニズムの説明も必要であろう。
- (3) 凹凸を数 μm より大きくした場合には凹凸形成のプロセス検討が必要となろう。現状では、サンドブラストやシリカ粒子の接着等を試してみたものの、これらは比較的成本が低く、工業製品に採用しやすい。さらに、有機材料、無機材料ともに採用しやすく、成型した部品に凹凸を形成することが簡単である。これ以上凹凸を大きくした場合には、凹凸を含めて成型する方法を採用する必要がある。ガラスや有機材料では加熱し、軟化させて加工することになるが、プロセスとしてはかなり難易度が高いと思われる。
- (4) 本研究では実験的に絶縁体の帯電・放電の解明を目指した。一方で、シミュレーション技術も進化しており、電子顕微鏡において電子ビーム当たった際の帯電を考慮して、電子ビーム軌道を計算し、微細化する半導体パターンの計測精度向上を図る試みがなされている[31][32]。シミュレーションでは電子軌道、二次電子発生、帯電、電子の移流を一括して計算しており、二次電子なだれまでは計算できると思われる。表面凹凸は現状考慮されておらず、絶縁体の規模に対して凹凸のスケールは非常に小さいため、直接モデル化するとシミュレーションの要素数が増大するため、何らかの近似が必要であろう。
- (5) 今後はさらに、絶縁体の二次電子放出係数や移動度、拡散係数等の基本的なパラメータが必要である。したがって、これらのデータの実測が必要である。

8. 謝辞

指導教官である鎌田教授には長期間にわたる熱心なご指導を頂きまして、この場をお借りして大変感謝申し上げます。

また、本研究を最初に提案していただいた(株)日立製作所 武内良三 元技術主幹、装置の立ち上げや各種試験にご尽力いただいた(株)日立製作所 横須賀俊之 主任研究員、畑中歩 研究員、試料の提供や結果の検討にご尽力いただいた(株)日立メディコ 土肥元達 元分工場長、円谷喜明 主任技師、関善隆 主任技師に、この場をお借りしてお礼を申し上げます。

9. 参考文献

- [1] 菅ノ又伸治, 鎌田譲, 大石和明, 塩野繁男, "SF6 ガスの絶縁特性," *日立評論*, vol. 51, no. 12, pp. 1157-1161, 1969.
- [2] 品田博之, "原子分解能・ホログラフィー電子顕微鏡の開発," *日立評論*, vol. 97, no. 06-07, pp. 90-102, 2015.
- [3] 山本修, 齊藤芳男, 大久保仁, 堀田栄喜, 山内邦仁, 鶴田浩一, "真空放電の制御と応用," vol. 126, no. 8, pp. 731-738, 2006.
- [4] "電磁操作式 VCB 適用 72/84kV C-GIS," *日立評論*, vol. 97, no. 01-02, p. 67, 2015.
- [5] 奥平哲平, 仁田工美, 高橋真人, 豊田和弘, "模擬静止軌道環境下における太陽電池アレイ表面のフラッシュオーバー放電の伝搬範囲," *電気学会論文誌 A*, vol. 130, no. 9, pp. 793-799, 2010.
- [6] 仁田工美, 高橋真人, "帯電・放電現象に関わる衛星材料のパラメータの計測," *電気学会論文誌 A*, vol. 129, no. 11, pp. 739-745, 2009.
- [7] 電気学会放電ハンドブック出版委員会, *放電ハンドブック*, vol. 上, 1998.
- [8] 家田正之, *現代高電圧工学*, オーム社, 1981.
- [9] 山本修, 濱田昌司, *高電圧工学*, オーム社, 2011.
- [10] Hackam and Altechah, *J. Appl. Phys*, vol. 46, no. 627, 1975.
- [11] Shioiri, Kamikawaji, Kaneko, Okawa and Oshima, *Proc. 8th Symp. on High Voltage Engineering*, p. 473, 1994.
- [12] 日高邦彦, *高電圧工学*, 数理工学社, 2009.
- [13] Suharyanto, Y. Yamano, S. Kobayashi, S. Michizono and Y. Saito, "Secondary Electron Emission and Surface Charging Evaluation of Alumina Ceramics and Sapphire," *IEEE Trans. on DEI*, vol. 13, no. 1, pp. 72-78, 2003.
- [14] J. W. Wetzer, "Vacuum Insulator Flashover Mechanisms, Diagnostics and Design Implications," *IEEE Trans. DEI*, vol. 4, no. 4, pp. 349-357, 1997.
- [15] 川田則幸, 鶴崎一也, 原田朋広, 小林信一, "真空中における沿面放電耐力向上に関する研究," vol. 33, no. 2, p. 138, 1996.
- [16] O. Yamamoto, T. Satoh, H. Hahashi, S. Hamada, T. Kobayashi, H. Omura and H. Morii, "Effects of Roughing Insulator Surface on Charging and Flashover Characteristics of Long Glass Insulator in Vacuum," *電気学会論文誌 A*, vol. 126, no. 8, p. 769, 2006.
- [17] O. Yamamoto, T. Takuma, Y. Kakehashi and S. Ikoma, "Decay Characteristics of Surface Charging on a Cylindrical Insulator in Vacuum," *IEEE Trans. DEI*, vol. 7, no. 6, pp. 812-817, 2000.
- [18] O. Yamamoto, T. Takuma, M. Fukuda and S. Nagata, "Improving Withstand Voltage by Roughening the Surface of an Insulating Spacer Used in Vacuum,"

- IEEE Trans. DEI*, vol. 10, no. 4, pp. 550-556, 2003.
- [19] O. Yamamoto, S. Hamada, T. Fukuda and H. Omura, "Charging Characteristics of a Solid Insulator in Vacuum under ac Voltage Excitation," *IEEE Trans. DEI*, vol. 13, no. 1, pp. 2-9, 2006.
 - [20] I. D. Chalmers, J. H. Lei, B. Yang and W. H. Siew, "Surface Charging and Flashover on Insulators in Vacuum," *IEEE Trans. DEI*, vol. 2, no. 2, pp. 225-230, 1995.
 - [21] K. Suzuki, K. Kato, Y. Hakamata and H. Okubo, "Real-time and High-speed Measurements of Charging Process on Dielectric Surface in Vacuum," *IEEE Trans. DEI*, vol. 10, no. 4, pp. 563-568, 2003.
 - [22] T. Hosono, K. Kato, A. Morita and H. Okubo, "Surface Charges on Alumina in Vacuum with Varying Surface Toughness and Electric Field Distribution," vol. 14, no. 3, p. 627, 2007.
 - [23] K. Suzuki, K. Kato, Y. Hakamata and H. Okubo, "Real-time and High-speed Measurements of Charging Processes on Dielectric Surface in Vacuum," vol. 10, no. 4, p. 563, 2003.
 - [24] Y. Yamano, S. Ito, K. Kato, Y. Hakamata and H. Okubo, "Influence of Electric Field Distribution on Charging Mechanism on Alumina Dielectrics by Triple Junction in Vacuum," p. 135, 2000.
 - [25] 三好元介, "親指サイズ電子顕微鏡の研究・開発," vol. Vol.40, no. No.2.
 - [26] H. Morita, T. Yokosuka, A. Hatanaka, R. Takeuchi, Y. Dan and M. Doi, "Electrostatic Potential Distribution Characteristics of Glass Surfaces in Vacuums," *Proc. ISDEIV 2008*, pp. 54-57, 2008.
 - [27] H. Morita, "Electrostatic Potential Distribution Measurement in Vacuum," *Electrical Insulation News in Asia*, vol. 16, p. 48, 2009.
 - [28] 森田裕, 畑中歩, 横須賀俊之, 関善隆, 土肥元達, "真空中固体表面の電位計測とその応用," *電気学会論文誌 A*, vol. 132, no. 1, pp. 95-100, 2012.
 - [29] 山口晋一, "微小面積表面電位測定技術," *IDEMA Japan News*, vol. 53, p. 1, 2002.
 - [30] 立藺信一, 吉村圭, 内藤孝, "鉛フリーバナジウム系低融点ガラスペースト," *日立化成テクニカルレポート*, no. 52, pp. 27-29, 2009.
 - [31] 李燦, 横須賀俊之, 小林金也, 数見秀之, "帯電シミュレータの開発と帯電現象への適用 (1)," *第 71 回応用物理学会学術講演会予稿集*, 2010.
 - [32] 横須賀俊之, 李燦, 小林金也, 数見秀之, "帯電シミュレータの開発と帯電現象への適用 (2)," *第 71 回応用物理学会学術講演会予稿集*, 2010.
 - [33] 電気学会, 電気専門用語集 No.25 放電, コロナ社, 2004.
 - [34] 電気学会放電ハンドブック出版委員会, 放電ハンドブック, vol. 上, p. 312, 1998.

付録 専門用語及び記号・略号

以下に本文中の専門用語について説明する[33]。

部分放電 (Partial discharge)

電極間を短絡せず部分的に破壊する放電。例えば電極と固体絶縁物の間の空隙，固体絶縁物中のボイドなどで生じる放電を指す。流れる電流が小さいため，固体絶縁体や液体絶縁体の場合では放電による劣化に時間を要する。気体絶縁体の場合は局所的な電界集中による電離を伴うことが多く，コロナ放電とも呼ばれる。逆に電極間を短絡する放電を火花放電と呼ぶ。

火花放電 (Spark discharge)

陰極と陽極の間に存在する気体が高電界により絶縁破壊が生じ，両電極間に導電性の高い放電路が形成されて全路破壊となる状態。光と音を伴う場合が多く，放電電流が大きい。放電エネルギーが大きいため，特に有機物での固体絶縁体の表面に沿った火花放電，あるいは絶縁体を貫通する火花放電では絶縁体が不可逆的に劣化し，再度電圧印加ができない場合もある。

火花電圧 (Sparkover voltage)

火花放電が発生するときの印加電圧。

絶縁破壊 (Electric breakdown, Dielectric breakdown)

絶縁体が高電界を加えた場合に両電極を導電性の高い放電路が形成され，両電極間を短絡すること。電極間の電圧がほぼゼロにまで低下する現象。絶縁体には気体，液体，固体，およびその複合体も含む。

沿面放電 (Creeping discharge)

気体－固体，気体－液体，液体－固体などの境界面において，一方の絶縁体を電離しながら他方の絶縁体表面を沿って進展する放電。真空中の固体に沿って進展する放電も沿面放電の一種と見なされる。

フラッシュオーバー (Flashover)

沿面放電が進展して電極間を全路破壊した状態を指す。沿面放電の最終的放電形態。

電子なだれ (Electron avalanche)

電子が電界により加速されて原子あるいは分子と衝突電離を繰り返した結果，荷電粒子の数が指数関数的に増大する現象。

コンディショニング効果 (Conditioning effect)

電極間での絶縁破壊の繰返しや，電極の加熱，あるいは電極への低気圧放電等の処理を施すことにより，電極間の絶縁破壊電圧が上昇し，次第に飽和する現象。真空中での放電ではこの効果が著しい。電極表面の処理により，電極表面上の微小な突起，付着微粒子，吸着ガス等絶縁破壊に対する弱点が取り除かれるためと考えら

れている。真空絶縁機器では耐電圧を向上するためにコンディショニング効果を用いることが多い。

三重点 (Triple junction)

2種類の誘電体の界面が電極と交わる場所。接触点ともいわれる。例えば、空気中で電極と絶縁体が接する箇所は空気とも接しており、電極、絶縁体、空気の3種が接する。電極に電圧を印加した場合、理論的にはここでの電界はその形状により無限大あるいはゼロとなる。物質の三重点(固体－液体－気体が共存する状態)とは意味が異なる

電界放出 (Electric field emission)

物体表面に強い電界を加えることでポテンシャル障壁を薄くなり、トンネル効果によって表面を抜けた電子が外部へ放出する現象。物質表面に電場が加わると、ショットキー効果によって仕事関数が減少する。電場をさらに大きくし、表面近傍（ 10\AA 程度以下）の空間の仕事関数がフェルミ準位以下になると、トンネル効果によって金属内の電子が常温でも外部に放出される。一般的には、金属や半導体の表面に強い電界(概ね 10MV/mm 以上)を加えたとき、表面から電子が放出される。陰極が微細な突起形状である場合には、その先端で電界集中が発生するので、加える電界はさらに低い電界でも電子が放出される。この現象を応用したものが、電子顕微鏡用電子源や電界放出ディスプレイである。